



Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Electrónica y Telecomunicaciones

Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos con LoRaWAN en cuencas hidrográficas en función del tamaño de carga útil, altura del gateway y potencia de transmisión

*Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones.*

Autor :

Juan Francisco Peralta Santos

C.I. 0104812532

Director :

Ing. Alcides Fabián Araujo Pacheco, M.Sc

C.I. 0102358504

Co-Director :

Ing. Darwin Fabián Astudillo Salinas, PhD

C.I. 0103907036

Cuenca - Ecuador
2018



Resumen

El rápido crecimiento de dispositivos inteligentes y el paradigma del IoT, requieren de sistemas de comunicación ubicua que integren de manera nativa servicios de internet con un bajo consumo de energía, LoRa destaca por su eficiencia energética, amplio rango de transmisión y facilidad de implementación. Este documento se enfoca en el análisis de esta tecnología en diferentes ambientes de la provincia del Azuay, con el objetivo de obtener modelos de pérdidas de trayectoria que permitan el diseño y análisis de redes LoRa, si bien, se realizó un primer análisis en estos ambientes, no se tomó en consideración variables como la altura del gateway, tamaño de carga útil y potencia de transmisión. En un trabajo previo se encontró que los valores de RSSI menores a -110 dBm entregados por el kit de evaluación LoRa 900 no son confiables para ser usados en el modelo o en la comparación estadística. Utilizando la prueba de Dunn, se demostró que no es necesario la modificación del modelo de pérdidas de trayectoria tomando en cuenta el tamaño de carga útil, ya que todas las variaciones de configuración analizadas se encuentran relacionadas. Los resultados de las constantes del modelo demostraron tener una relación lineal con la altura de los equipos, por lo que se modificó el modelo logarítmico inicial tomando en cuenta la altura, adicionalmente se exponen las constantes de modelo de los ambientes analizados para su uso en el modelo de pérdidas de LoRaSim.

Palabras Clave : LoRa, LoRaWAN, IoT, RSSI, SNR, Pérdidas, Forestal, Río, Propagación, Modelo.



Abstract

The rapid growth of smart devices and the IoT paradigm require ubiquitous communication systems that natively integrate internet services with low power consumption. LoRa stands out for its energy efficiency, broad transmission range and ease of implementation. This document focuses on the analysis of this technology in different environments of the province of Azuay, with the objective of obtaining trajectory loss models that allow the design and analysis of LoRa networks, although, a first analysis in these environments, variables such as the height of the gateway, size of payload and transmission power were not taken into consideration. In a previous work it was found that the RSSI values lower than -110 dBm delivered by the LoRa 900 Evaluation Kit are not reliable to be used in the model or in the statistical comparison. Using the Dunn test, it was shown that modification of the trajectory loss model taking into account the payload size is not necessary, since all the configuration variations analyzed are related. The results of the model constants proved to have a linear relationship with the height of the equipment, so the initial logarithmic model was modified taking into account the height, in addition the model constants of the analyzed environments are exposed for use in the loss model of LoRaSim.

Keywords : LoRa, LoRaWAN, IoT, RSSI, SNR, Path loss, Forested, Riverside, Propagation, Model.





Índice general

Resumen	III
Abstract	V
Índice general	VII
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XIII
Dedicatoria	XVII
Agradecimientos	XIX
Abreviaciones y acrónimos	XXI
1. Introducción	1
1.1. Identificación del Problema	1
1.2. Justificación	2
1.3. Alcance	2
1.4. Objetivos	3
1.4.1. Objetivo General	3
1.4.2. Objetivos específicos	3
2. Marco Teórico	5
2.1. Introducción	5
2.2. El internet de las cosas: redes de sensores inalámbricos	6
2.3. Redes de amplia cobertura y baja potencia (LPWAN)	6
2.4. Modulación LoRa	7
2.4.1. Espectro ensanchado LoRa	8
2.4.2. Asignación de espectro LoRa	8
2.5. Long range wide area network (LoRaWAN)	10



2.5.1. Arquitectura LoRaWAN	10
2.5.2. Clases de dispositivos LoRaWAN	11
2.6. Activación de dispositivos finales	12
2.6.1. Activación por personalización(ABP)	12
2.7. Modelo de pérdidas de trayectoria	13
2.8. Conclusiones	13
3. Estado del Arte	15
3.1. Trabajos que analizan el desempeño de redes LoRaWAN	15
3.2. Trabajos que proponen mejoras a LoRaWAN	16
3.3. Conclusiones	17
4. Metodología	19
4.1. Descripción de Equipos	19
4.2. Diagrama de bloques de la prueba	21
4.3. Disposición y Configuración de los equipos	22
4.3.1. Configuración del Receptor	23
4.3.2. Configuración del Transmisor	23
4.4. Descripción del procedimiento	24
4.4.1. Cantidad de paquetes enviados e Intervalo de medición	24
4.4.1.1. Estimación de tiempos de medición	24
4.5. Descripción de los Ambientes	25
4.6. Comparación estadística de las campañas de medición y modelo de propagación .	29
4.7. Conclusión	29
5. Resultados	31
5.1. Mediciones de RSSI, SNR y PER	31
5.2. Comparación estadística de las campañas de medición	32
5.2.1. Comparación estadística del Río Tomebamba	32
5.2.2. Comparación estadística del Río Machángara	33
5.2.3. Comparación estadística del Río Paute	35
5.2.4. Comparación estadística entre ambientes	36
5.3. Valores promedio y ajuste logarítmico de RSSI	37
5.3.1. Valores promedio de RSSI con su ajuste logarítmico para el Río Tomebamba	37
5.3.2. Valores promedio de RSSI con su ajuste logarítmico para el Río Machángara	37
5.3.3. Valores promedio de RSSI con su ajuste logarítmico para el Río Paute . .	39
5.4. Generación del modelo de pérdidas de trayectoria	44
5.4.1. Modelo de pérdidas de trayectoria para el Río Tomebamba	44
5.4.2. Modelo de pérdidas de trayectoria para el Río Machángara	44
5.4.3. Modelo de pérdidas de trayectoria para el Río Paute	47



5.5. Comparación de modelos de pérdidas de trayectoria	49
5.6. Propuesta de modificación al modelo de pérdidas de trayectoria en función de la altura	51
5.6.1. Modelo de pérdidas de trayectoria del Río Tomebamba	51
5.6.2. Modelo de pérdidas de trayectoria del Río Machángara	51
5.6.3. Modelo de pérdidas de trayectoria del Río Paute	51
5.7. Comparación de los modelos propuestos con trabajos previos	52
5.8. Comparación de los modelos propuestos con LoRaSim	53
5.9. Conclusiones	55
6. Conclusiones y Recomendaciones	57
6.1. Conclusiones	57
6.2. Recomendaciones	58
6.3. Trabajos Futuros	58
A. Reporte Técnico	61
B. Mediciones de RSSI y SNR	95
B.1. Mediciones del Ambiente 1: Río Tomebamba	97
B.1.1. Datos de RSSI	97
B.1.2. Datos de SNR	99
B.1.3. Datos de PER	100
B.2. Mediciones del Ambiente 2 : Río Machángara	103
B.2.1. Datos de RSSI	103
B.2.2. Datos de SNR	105
B.2.3. Datos de PER	106
B.3. Mediciones del Ambiente 3 : Río Paute	109
B.3.1. Datos de RSSI	109
B.3.2. Datos de SNR	111
B.3.3. Datos de PER	112
Bibliografía	115





Índice de figuras

2.1. Velocidad de datos requerida contra capacidad de rango de las tecnologías de comunicación de radio[1].	7
2.2. Ventajas de Sigfox, LoRa y NB-IoT en términos de factores de IoT[1].	7
2.3. Canales de Frecuencias US902-928	9
2.4. Arquitectura LoRaWAN [2]	11
2.5. Clases de dispositivos LoRaWAN [2]	12
4.1. Kit de evaluación LoRa 900.[3]	20
4.2. Gateway LoRa 900.[3]	20
4.3. RN2903 LoRa Mote [3]	21
4.4. Diagrama de bloques de la prueba	22
4.5. Disposición de los equipos	22
4.6. Circuito de control	23
4.7. Localización de los ambientes en la provincia	25
4.8. Ambiente 1: Río Tomebamba	26
4.9. Perfil de elevación río Tomebamba	26
4.10. Ambiente 2: Río Yanuncay	27
4.11. Perfil de elevación río Machángara	28
4.12. Ambiente 3: Río Paute	28
4.13. Perfil de elevación río Paute	29
5.1. Modelos para diferentes valores P	34
5.2. Valores de RSSI promedio en el Río Tomebamba	38
5.3. Comparación de modelos RSSI en el Río Tomebamba	39
5.4. Valores de RSSI promedio en el Río Machángara	40
5.5. Comparación de modelos RSSI en el Río Machángara	41
5.6. Valores de RSSI promedio en el Río Paute	42
5.7. Comparación de modelos RSSI en el Río Paute	43
5.8. Modelo de Pérdidas de trayectoria del Río Tomebamba	45
5.9. Modelo de Pérdidas de trayectoria del Río Machángara	46



5.10. Modelo de Pérdidas de trayectoria del Río Paute	48
5.11. Comparación de pérdidas de trayectoria entre ambientes	49
5.12. Ajuste lineal de la constante a del modelo de pérdidas de trayectoria	50
5.13. Ajuste lineal de la constante b del modelo de pérdidas de trayectoria	50
5.14. Rango de pérdidas de trayectoria del modelo propuesto del río Tomebamba	52
5.15. Rango de pérdidas de trayectoria del modelo propuesto del río Machángara	53
5.16. Rango de pérdidas de trayectoria del modelo propuesto del río Paute	53
5.17. Modelo de perdidas de trayectoria por defecto LoRaSim	54
B.1. RSSI Río Tomebamba	97
B.2. Comparación de RSSI entre alturas Río Tomebamba	98
B.3. SNR Río Tomebamba	99
B.4. PER Río Tomebamba	100
B.5. Comparación de PER entre alturas Río Tomebamba	101
B.6. RSSI Río Machángara	103
B.7. Comparación de RSSI entre alturas Río Machángara	104
B.8. SNR Río Machángara	105
B.9. PER Río Machángara	106
B.10. Comparación de PER entre alturas Río Machángara	107
B.11. RSSI Río Paute	109
B.12. Comparación de RSSI entre alturas Río Paute	110
B.13. SNR Río Paute	111
B.14. PER Río Paute	112
B.15. Comparación de PER entre alturas Río Paute	113



Índice de tablas

2.1. Tabla de tasas de datos LoRa [4]	9
2.2. Tabla de Frecuencias Regional LoRa [5]	9
2.3. Tasa de datos de transmisión US902-928 [6]	10
2.4. Potencia de transmisión US902-928 [6]	10
5.1. Valores P del <i>test</i> de Dunn Río Tomebamba 1m	32
5.2. Valores P del <i>test</i> de Dunn Río Tomebamba 2m	32
5.3. Valores P del <i>test</i> de Dunn Río Tomebamba 3m	33
5.4. Valores P del <i>Test</i> de Dunn Río Tomebamba entre alturas	33
5.5. Valores P del <i>test</i> de Dunn Río Machángara 1m	33
5.6. Valores P del <i>test</i> de Dunn Río Machángara 2m	35
5.7. Valores P del <i>test</i> de Dunn Río Machángara 3m	35
5.8. Valores P del <i>test</i> de Dunn Río Machángara entre alturas	35
5.9. Valores P del <i>test</i> de Dunn Río Paute 1m	36
5.10. Valores P del <i>test</i> de Dunn Río Paute 2m	36
5.11. Valores P del <i>test</i> de Dunn Río Paute 3m	36
5.12. Valores P del <i>test</i> de Dunn Río Paute entre alturas	36
5.13. Valores P del <i>test</i> de Dunn entre Ambientes	37
5.14. Constantes del modelo de RSSI para el Río Tomebamba	37
5.15. Constantes del modelo de RSSI para el Río Machángara	39
5.16. Constantes del modelo de RSSI para el Río Paute	39
5.17. Valores utilizados para el cálculo de las pérdidas de trayectoria	44
5.18. Constantes del modelo de RSSI para el Río Tomebamba	44
5.19. Constantes del modelo de RSSI para el Río Machángara	44
5.20. Constantes del modelo de RSSI para el Río Paute	47
5.21. Valores del modelo lineal para la constante a	49
5.22. Valores del modelo lineal para la constante b	50
5.23. Resultados de los modelos de perdidas de trayectoria	55



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Juan Francisco Peralta Santos, autor del trabajo de titulación "Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos con LoRaWAN en cuencas hidrográficas en función del tamaño de carga útil, altura del gateway y potencia de transmisión", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 25 de octubre de 2018



Juan Francisco Peralta Santos

C.I: 0104812532



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Juan Francisco Peralta Santos, en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricos con LoRaWAN en cuencas hidrográficas en función del tamaño de carga útil, altura del gateway y potencia de transmisión", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 25 de octubre de 2018

Juan Francisco Peralta Santos

C.I: 0104812532





Dedicatoria

A mi abuelita querida

Sin tus enseñanzas y ocurrencias no podría haber llegado tan lejos, todo lo que soy en gran parte lo aprendí de ti, y aunque haya días en que no nos soportemos siempre serás el gran pilar de mi vida, gracias por tanto.

Juan Peralta





Agradecimientos

A mi familia

Gracias por su paciencia en todos estos años de estudio, todas las horas que invertí fueron pensando en ustedes y no duden que seguiré trabajando por verlos cada día más felices.

A mis amigos

Los últimos años conocí a las personas que me acompañaran toda la vida, me alegra ver cumplir sus sueños, sé que serán unos excelentes profesionales. De cada uno me llevo una enseñanza y estén seguros de contar conmigo por siempre.

A mis maestros

En especial al Ing. Alcides Araujo, Ing. Fabián Astudillo y Ing. Andrés Vazquez, los cuales guiaron este trabajo de titulación y con sus enseñanzas y anécdotas, nos regalaron un poco de su sabiduría.

Juan Peralta





Abreviaciones y Acrónimos

5GTN 5G Test Network. [22](#)

6LoWPAN IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks. [22](#)

ABP Activation by personalization. [14](#)

BER Bit Error Rate. [4](#)

BW Bandwidth. [3](#)

CRC cyclic redundancy check. [12](#)

CSS Chirp Spread Spectrum. [8](#)

FADR Fair Adaptive Data Rate. [22](#)

FCC Federal Communications Commission. [10](#)

IoT Internet of Things. [2](#), [6](#), [7](#), [11](#), [17](#), [21](#), [22](#), [67](#)

LoRa Long Range. [2](#), [5–9](#), [11](#), [12](#), [15–17](#), [19–21](#), [24–28](#), [35](#), [47](#), [66](#), [67](#), [71](#)

LoRaWAN Long Range Wide Area Network. [2–6](#), [11](#), [14](#), [17](#), [19–22](#), [24–26](#), [29](#), [66](#), [67](#)

LPWAN Low Power Wide Area Network. [2](#), [6](#), [7](#), [11](#), [22](#)

MAC Media Access Control Layer. [2](#), [6](#), [12–14](#), [19](#), [21](#), [26](#), [67](#)

OTAA Over the air activation. [14](#)

PER Packet Error Rate. [3](#), [24](#), [30](#), [38](#), [66](#), [67](#)

RSSI Received Signal Strength Indicator. [3–5](#), [16](#), [20](#), [24](#), [30](#), [35](#), [38](#), [42](#), [47–49](#), [54](#), [63](#), [64](#), [66](#), [71](#)

SF Spreading Factor. [3](#), [8](#), [20](#), [29](#), [30](#), [41](#), [42](#), [44](#), [45](#), [47](#), [63](#), [66](#)

SNR Signal to Noise Ratio. [3](#), [4](#), [24](#), [38](#), [66](#), [71](#)

TIC Tecnologías de la información y la comunicación. [6](#)

WSN Wireless Sensor Network. [2](#), [6](#), [17](#), [20](#)





Capítulo 1

Introducción

En este capítulo, se expone el problema y justificación del proyecto de investigación, además del alcance y los objetivos general y específicos a cumplir durante el mismo.

1.1. Identificación del Problema

En la actualidad, las [Wireless Sensor Network \(WSN\)](#), nos ofrecen la capacidad de medir, inferir y comprender indicadores ambientales; desde zonas ecológicas delicadas hasta entornos urbanos. [7] Esto permite la creación de una serie de objetos de uso cotidiano con capacidades de adquisición, de información, procesamiento y comunicación, de tal forma que puedan comunicarse entre ellos y ofrecer nuevos servicios a sus usuarios; denominada inteligencia ambiental [8].

En el marco de este paradigma, el [Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones \(DEET\)](#) en beneficio del [Programa para el Manejo del Agua y Suelo \(PROMAS\)](#), propone el proyecto *Aplicación de tecnologías inalámbricas al sistema de predicción de caudales en la cuenca del río Tomebamba* [9], el objetivo principal del proyecto es el de implementar un dispositivo registrador de datos que permita la adquisición de datos de un sensor limnigráfico¹ utilizando una red [Low Power Wide Area Network \(LPWAN\)](#) basada en la tecnología [Long Range \(LoRa\)](#).

Al ser [LoRa](#) una tecnología de transmisión nueva, se han realizado pocos estudios sobre el comportamiento del mismo en diferentes ambientes así como la respuesta de dicho sistema ante el cambio de parámetros de transmisión.

¹Medidores de los niveles de agua de los ríos, lagos o algún cuerpo de agua, se usan para la predicción de crecidas (máximas alturas de agua), definir o delinear zonas con riesgo de inundación y para proyectar estructuras (puentes u otras obras hidráulicas).[10]



1.2. Justificación

Se realizó un primer análisis en el entorno de trabajo requerido (ribera del río) [11]; sin embargo, al ser la primera aproximación, dicho estudio no toma en consideración variables de interés como son la altura de la antena, el tamaño de la carga útil y potencia de transmisión los cuales son necesarios al momento de la planificación y diseño de WSN; con esta tecnología para mejorar el alcance y la fiabilidad del sistema.

Las redes LPWAN están logrando gradualmente más interés por parte de la industria [12], uno de los nuevos enfoques para redes LPWAN es LoRa. El despliegue de una red de nodos que utilice LoRa, resulta factible por su bajo costo, velocidad de despliegue y gran cobertura [13], además de contar con un bajo consumo energético. Dichos nodos recolectarán y transmitirán información que están relacionadas con variables climáticas tales como temperatura, lluvia, humedad, etc. [14].

La capa física de LoRa se puede usar con cualquier capa de red como: LoRa Blink y Lora FABIAN [15]. Sin embargo, este proyecto se enfocará en Long Range Wide Area Network (LoRaWAN), la cual es una especificación de protocolo creada por LoRa Alliance con el objetivo de cumplir los requisitos claves del Internet of Things (IoT) como la comunicación segura a largo alcance, sin la necesidad de grandes velocidades y el menor consumo de energía. La arquitectura de LoRaWAN se presenta en una topología en estrella donde el *gateway* actúa como un puente transparente entre los nodos y un servidor central.

1.3. Alcance

El proyecto estará enfocado en una extensión del modelo de pérdidas de trayectoria en ambientes forestales propuesto por [11]. Tomando en consideración variaciones del tamaño de carga útil, altura de *gateway* y potencia de transmisión. Si bien LoRa ofrece un alcance teórico de 10Km con línea de vista, se requiere dimensionar los sistemas con alcances reales, mismos que dependen del ambiente específico en el que se encuentran y de los parámetros antes mencionados. Para lograr esto, se harán mediciones del indicador Received Signal Strength Indicator (RSSI) utilizando el kit de evaluación LoRa 900 de Microchip [3] el cual trabaja en la frecuencia de 915MHz, este kit permite la modificación de diferentes parámetros como el Spreading Factor (SF), Bandwith (BW) y potencia de transmisión. Se tomará el Packet Error Rate (PER) como parámetro de calidad de la red. Las transmisiones serán receptadas por el *gateway*, que a su vez las transmitirá al servidor, el mismo, guardará un registro de los RSSI, relación señal a ruido (Signal to Noise Ratio (SNR)) y porcentaje de paquetes perdidos (PER) de las transmisiones [11]. Se realizarán pruebas iniciales en un entorno controlado de laboratorio para garantizar la fiabilidad de las mediciones basadas en RSSI. Además, las transmisiones serán evaluadas con dos tipos de antenas: omnidireccionales y direccionales.

Con los datos obtenidos se ajustará una curva en pérdidas de trayectoria basada en RSSI

que permita el ajuste del modelo empírico de pérdidas propuesto [11] ante cambios de tamaño de carga útil y altura de *gateway*. Esto permitirá establecer un modelo empírico que podrá ser utilizado para el diseño de una red LoRaWAN en los ambientes antes mencionados. Además, se mostrará una comparación de los modelos obtenidos en distintos escenarios y entornos de operación.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Ajustar un modelo de pérdidas de trayectoria basado en RSSI y SNR que permita realizar modelos analíticos y simulaciones para facilitar la implementación de redes de sensores con tecnología LoRaWAN en márgenes de ríos con entornos forestales, en función de la distancia, tamaño de la carga útil, altura de las antenas y potencia de transmisión.

1.4.2. Objetivos específicos

- Analizar el estado del arte de la variación del alcance de tecnología LoRaWAN con respecto a la variación de altura, de tamaño de la carga útil y de potencia de transmisión.
- Configurar el kit de desarrollo de LoRa con LoRaWAN, para el envío y captura de datos.
- Realizar una metodología para el estudio del rango de transmisión con respecto al tamaño de la carga útil, altura del *gateway* y potencia de transmisión.
- Hacer una campaña de mediciones variando la altura del *gateway*, tamaño de la carga útil y potencia de transmisión en las que se tomarán muestras de RSSI, SNR y Bit Error Rate (BER) a diferentes distancias.
- Comparar los resultados con las mediciones obtenidas en análisis anteriores.
- Ajustar un modelo de pérdidas de trayectoria adecuado para el uso de LoRa en márgenes de ríos con ambientes forestales.
- Comparar el modelo por defecto de LoRaSim con el modelo de propagación propuesto.
- Comparar los resultados con las mediciones obtenidas en diferentes entornos de operación.





Capítulo 2

Marco Teórico

En el presente capítulo, se muestra de manera detallada el funcionamiento de [LoRaWAN](#), partiendo desde una base general en la que se explican conceptos de redes de sensores inalámbricos, hasta el funcionamiento y aspectos importantes de la modulación [LoRa](#) y la manera en la que se puede utilizar el [RSSI](#) para determinar un modelo de pérdidas de propagación.

Este capítulo aborda estos aspectos y resume las características técnicas de la capa de red con propiedades de capa [Media Access Control Layer \(MAC\) LoRaWAN](#), misma que es la implementación más común en dispositivos [LoRa](#).

2.1. Introducción

El rápido crecimiento de dispositivos inteligentes y el paradigma del [IoT](#), requieren de sistemas de comunicación ubicua que integren de manera nativa servicios de internet con un bajo consumo de energía.

De este modo las tecnologías de comunicación [LPWAN](#) apuntan a ser esenciales en el desarrollo de aplicaciones [WSN](#) ya que permiten una comunicación inalámbrica eficiente en términos de potencia a grandes distancias. Los dispositivos típicamente se comunican directamente con un nodo receptor, lo que elimina la necesidad de construir y mantener una red compleja de múltiples saltos.

De entre las tecnologías [LPWAN](#), [LoRa](#) destaca por su eficiencia energética, amplio rango de transmisión y facilidad de implementación; además de ofrecer servicios de red para una gran variedad de capas de red y capas [MAC](#).

2.2. El internet de las cosas: redes de sensores inalámbricos

El **IoT** está emergiendo como una de las principales tendencias que configuran el desarrollo de las tecnologías en el sector de las **Tecnologías de la información y la comunicación (TIC)** en general [16, 17], se refiere al grupo de dispositivos y sistemas que interconectan sensores y actuadores del mundo real a internet. Esta interconexión incluye varios sistemas diferentes entre los cuales se encuentran: vehículos conectados a internet, dispositivos portátiles de control y medición de la salud, relojes e incluso dispositivos personales implantados; medidores inteligentes y objetos inteligentes; sistemas automatizados para el hogar y controles de iluminación[18].

El crecimiento de la cantidad de tecnología y la variedad de dispositivos que recopilan datos es increíblemente rápido. Un estudio de Cisco espera que la cantidad de dispositivos conectados a internet sea de 50 mil millones para 2020[19].

Las **WSN** están constituidas por sensores autónomos distribuidos espacialmente, con el propósito de ser capaces de comunicarse entre sí con un mínimo de consumo de energía y entregando su colección de datos. En el contexto del **IoT** juegan un papel importante para incrementar la ubicuidad de las redes[20].

2.3. Redes de amplia cobertura y baja potencia (LPWAN)

Las **LPWAN** están ganando cada vez más popularidad en las comunidades industriales y de investigación debido a sus características de comunicación de bajo consumo, largo alcance y bajo costo. Proporciona comunicación de largo alcance de hasta 10-40 km en zonas rurales y 1-5 km en zonas urbanas [21].

Dichas características las vuelven atractivas para aplicaciones **IoT**, donde se requiere la transmisión de pequeñas cantidades de datos a gran distancia como se muestra en la Figura 2.1

Las soluciones **LPWAN** ofrecen un gran rango de transmisión gracias a un diseño de capa física radicalmente nuevo, dirigido a una sensibilidad del receptor muy alta. Por ejemplo, si bien la sensibilidad nominal de los receptores ZigBee y Bluetooth es de aproximadamente -125 dBm y -90 dBm respectivamente, la sensibilidad típica de un receptor **LPWAN** es de alrededor de -150 dBm. La desventaja de estas conexiones de largo alcance es la baja velocidad de datos, la cual oscila generalmente entre algunos cientos y unos pocos miles de bits por segundo, significativamente más baja que las velocidades de bits admitidas por las tecnologías de corto alcance (250 kb/s en ZigBee y 1-2 Mb/s en Bluetooth)[21].

Muchas tecnologías **LPWAN** han surgido tanto en el ancho de banda de frecuencia licenciada como en la no licenciada. Entre ellas: Sigfox, **LoRa** y NB-IoT; con ventajas enfocadas a diferentes factores **IoT** como se muestra en la Figura 2.2.

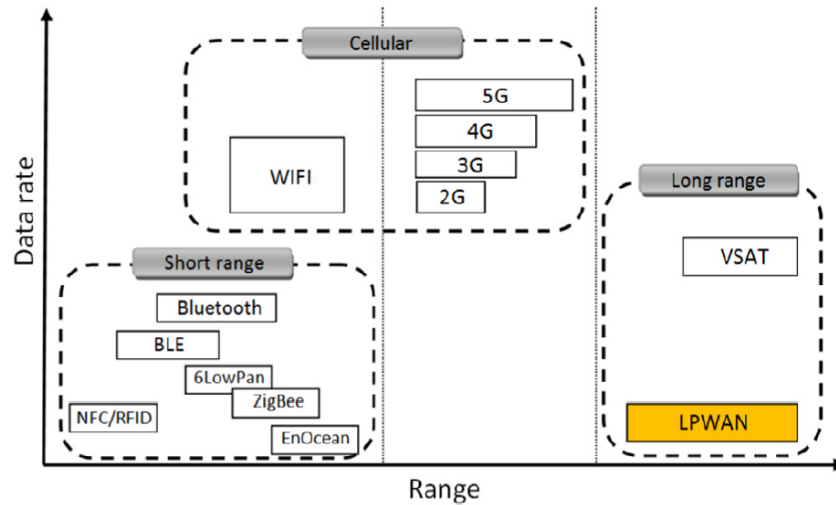


Figura 2.1: Velocidad de datos requerida contra capacidad de rango de las tecnologías de comunicación de radio[1].

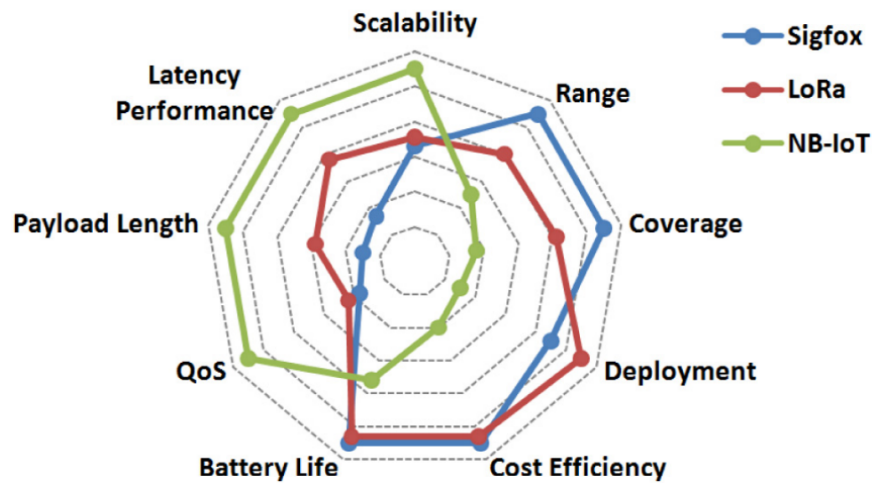


Figura 2.2: Ventajas de Sigfox, LoRa y NB-IoT en términos de factores de IoT[1].

2.4. Modulación LoRa

LoRa es una técnica de modulación de capa física basada en Chirp Spread Spectrum (CSS) con corrección de errores hacia adelante, lo que hace que las señales sean robustas ante interferencias y ruido de canal. Está desarrollado por Semtech¹, su modulación subyacente está patentada y nunca se ha descrito teóricamente[22]; sin embargo, se conoce por medio de hojas de datos[5] que la modulación utiliza tres parámetros diferentes que afectan principalmente a la robustez y la velocidad de bits: el factor de dispersión (SF), el ancho de banda (BW) y el Code

Rate (CR). Una ventaja de la modulación de espectro ensanchado es que las señales con **SF** ortogonales pueden coexistir con otras señales moduladas por **LoRa** en el mismo canal sin interferir, de igual manera coexisten con señales **Frequency Shift Keying (FSK)**[23]. La modulación **LoRa** cuenta las siguientes características:

- Fácil de instalar.
- Económica.
- Flexible y adaptable.
- Escalable.
- Transmisión bidireccional.
- Seguridad y encriptación de datos y privacidad.

2.4.1. Espectro ensanchado LoRa

Como ya se ha mencionado, Semtech¹ no ha descrito teóricamente su modulación patentada; no obstante en la especificación básica de la modulación **LoRa**[5] define que genera una señal *chirp* que varía continuamente en frecuencia. Una ventaja de este método es que los tiempos y los desplazamientos de frecuencia, entre el transmisor y el receptor son equivalentes. El ancho de banda de frecuencia de este *chirp* es equivalente al ancho de banda espectral de la señal. La señal de datos deseada se corta a una tasa de datos más alta y se modula en la señal *chirp*[5]. La tasa de Bit R_b se define en la ecuación 2.1.

$$R_b = SF \times \frac{Tasa\ de\ Código}{\frac{2^{SF}}{BW}} bits/sec \quad (2.1)$$

Donde:

$$Tasa\ de\ Código = \frac{4}{4 + CR} \quad (2.2)$$

Donde:

- SF = Factor de ensanchamiento, que puede variar entre 7 y 12
- CR = Tasa de codificación, que varía entre 1 y 4
- BW = Ancho de Banda (Hz)

2.4.2. Asignación de espectro LoRa

La especificación **LoRa** varía ligeramente de una región a otra en función de las diferentes asignaciones de espectro regionales y los requisitos normativos. Según el plan nacional de frecuencias[24] y la organización **LoRa Alliance**[6], en el país rige la normativa estadounidense US902-928 la cual es una banda de uso libre. En la Tabla 2.2 se resume las bandas de frecuencias para diferentes regiones.

¹Semtech Corporation - <http://www.semtech.com/>

Tabla 2.1: Tabla de tasas de datos LoRa [4]

Modo	Bit Rate Equivalente(kb/s)	Sensibilidad(dBm)	Δ (dB)
FSK	1.2	-122	-
LoRa SF=12	0.293	-137	+15
LoRa SF=11	0.537	-134.5	+12.5
LoRa SF=10	0.976	-132	+10
LoRa SF=9	1757	-129	+7
LoRa SF=8	3125	-126	+4
LoRa SF=7	5468	-123	+1
LoRa SF=6	9375	-118	-3

Tabla 2.2: Tabla de Frecuencias Regional LoRa [5]

Banda de Frecuencia	
Europa	867-869Mhz
Norte América	902-928Mhz
China	470-510Mhz
Corea	920-925Mhz
Japón	920-925Mhz
India	865-867Mhz

La banda ISM915 se divide en tres planes de bandas, dos planes de enlace ascendente de 64 y 8 canales; y un plan de enlace descendente de 8 canales. La representación de las frecuencias centrales de cada canal se expone en la Figura 2.3.

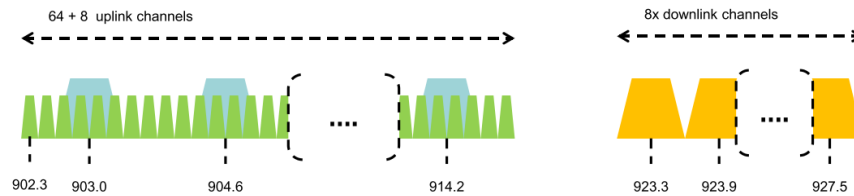


Figura 2.3: Canales de Frecuencias US902-928

La regulación de la [Federal Communications Commission \(FCC\)](#) impone un tiempo máximo de permanencia de 400 ms en los enlaces ascendentes, la codificación utilizada para velocidad de datos (DR) y potencia del dispositivo final(TXPower) para la banda US902-928 se resumen en las Tablas 2.3 y 2.4.

Tabla 2.3: Tasa de datos de transmisión US902-928 [6]

Tasa de Datos	Configuración	Tasa de Bits Capa Física[bit/seg]
0	LoRa:SF10/125kHz	980
1	LoRa:SF9/125kHz	1760
2	LoRa:SF8/125kHz	3125
3	LoRa:SF7/125kHz	5470
4	LoRa:SF8/500kHz	12500
5:7	RFU	
8	LoRa:SF12/500kHz	980
9	LoRa:SF11/500kHz	1760
10	LoRa:SF10/500kHz	3900
11	LoRa:SF9/500kHz	7000
12	LoRa:SF8/500kHz	12500
13	LoRa:SF7/500kHz	21900
14	RFU	

Tabla 2.4: Potencia de transmisión US902-928 [6]

Configuración(TXPower)	Potencia(dBm)
0	30
1	28
2	26
3:13	—
14	2

2.5. Long range wide area network (LoRaWAN)

LoRaWAN es un protocolo de red con que incluye funciones MAC de estándar abierto administrado por LoRa Alliance² destinada a la creación de redes LPWAN regionales, nacionales y mundiales. El protocolo y la arquitectura de red LoRaWAN tienen la mayor influencia para determinar la vida útil de la batería de un nodo, la capacidad de la red, la calidad del servicio, la seguridad y la variedad de aplicaciones atendidas por la red; mientras que el protocolo LoRa habilita el enlace de comunicación de largo alcance [2], aunque el rango de comunicación de LoRaWAN depende en gran medida del entorno u obstrucciones en una ubicación determinada[25].

2.5.1. Arquitectura LoRaWAN

Muchas de las redes IoT implementadas cuentan con una arquitectura en malla para aumentar el alcance de los nodos agregando complejidad, reduciendo la capacidad de la red y afectando la duración de la batería; ya que los nodos reciben y reenvían información de otros nodos probablemente irrelevante para ellos. Por esta razón, LoRaWAN utiliza una arquitectura de estrella de largo alcance donde las transmisiones de cada nodo son típicamente recibidos por

²LoRa Alliance - <https://loro-alliance.org/>

múltiples *gateways*. Cada *gateway* reenvía el paquete recibido a un servidor de red, por medio de una tecnología de acceso a internet (3G, 4G, Ethernet, Satelital, Wi-Fi, Wi-Max, etc). El servidor es el encargado de la gestión de red y eliminación de paquetes redundantes.

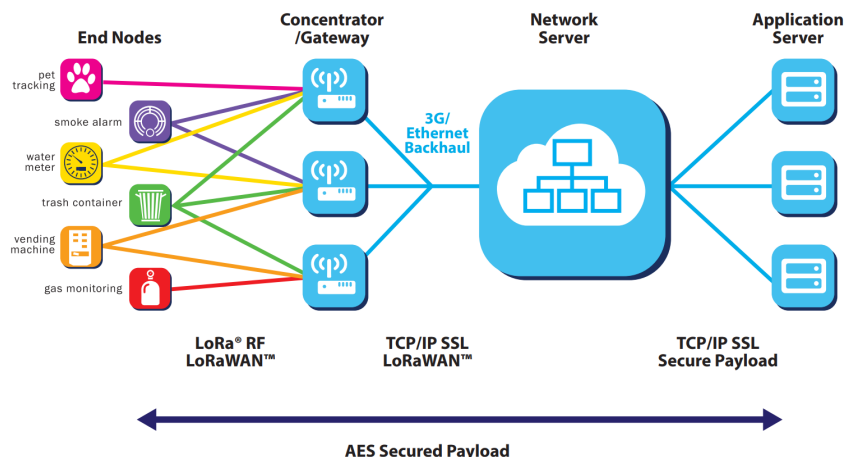


Figura 2.4: Arquitectura LoRaWAN [2]

2.5.2. Clases de dispositivos LoRaWAN

LoRaWAN utiliza diferentes clases de dispositivos, con el propósito de optimizar la latencia de comunicación de enlace descendente de la red frente a la duración de la batería, y acoplarse a los perfiles requeridos por las aplicaciones finales.

- **Dispositivos finales bidireccionales (Clase A):** Basado en el protocolo ALOHA, es el sistema de dispositivo final de menor consumo. Está diseñado para aplicaciones que sólo requieren comunicación de enlace ascendente hacia el servidor, una ventana de enlace descendente se abre poco después de que el dispositivo final haya realizado una transmisión. Las comunicaciones de enlace descendente desde el servidor tienen que esperar hasta el siguiente enlace ascendente programado.
- **Dispositivos finales bidireccionales con ranuras de recepción programadas (Clase B):** En adición a las ventanas de recepción aleatoria, los dispositivos de Clase B abren ventanas de recepción en tiempos programados, para ello reciben una baliza de sincronización desde el *gateway*.
- **Dispositivos finales bidireccionales con ranuras de recepción máxima (Clase C):** Los dispositivos finales de Clase C, utilizan más energía para operar que la Clase A o la Clase B, pero ofrecen la latencia más baja para la comunicación entre el servidor y el dispositivo final.

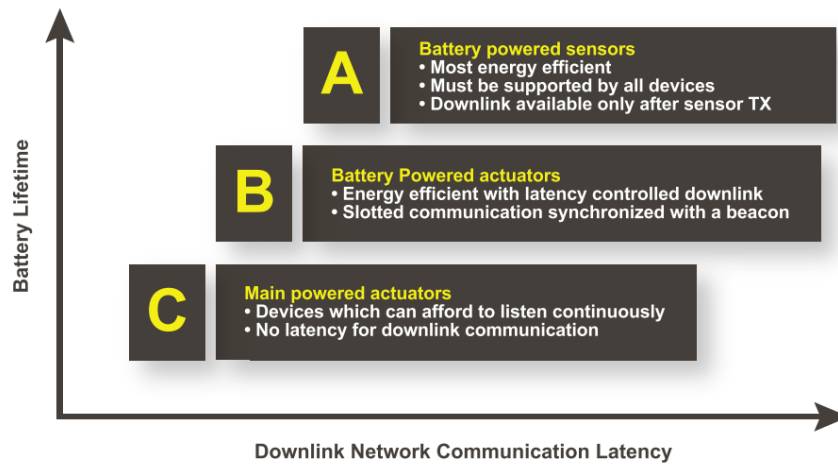


Figura 2.5: Clases de dispositivos LoRaWAN [2]

2.6. Activación de dispositivos finales

Para unirse a una red **LoRaWAN** cada dispositivo final tiene que ser personalizado y activado, **LoRaWAN** distingue dos maneras de lograr la activación: **Over the air activation (OTAA)** cuando se agrega un dispositivo nuevo o se reinicia un dispositivo existente; o **Activation by personalization (ABP)** cuando se cuenta con la dirección de la red a la que se desea unir.

Una vez realizada la activación del dispositivo final en la red **LoRaWAN**, se almacena una dirección de dispositivo (Identifican al dispositivo dentro de la red), un identificador de aplicación (identifica la entidad que procesa la trama de solicitud de agregación), una clave de sesión de red usada para el cifrado de la carga útil en los mensajes **MAC** y una clave de sesión de aplicación la cual se utiliza para el cifrado de la carga útil en mensajes de datos específicos de una aplicación[26].

2.6.1. Activación por personalización(ABP)

La activación por personalización vincula directamente un dispositivo final a una red específica, al eludir el procedimiento de aceptación. La activación de un dispositivo final por personalización significa que la dirección del dispositivo y las dos claves de sesión. El dispositivo final está equipado con la información requerida para participar en una red **LoRa** específica cuando se inicia. Cada dispositivo debe tener un conjunto único de clave de red y clave de aplicación.

Exponer las claves de un dispositivo no debe comprometer la seguridad de la comunicación de otros dispositivos. El proceso para construir estas claves deben ser tal que no se puedan derivar de ninguna manera de la información disponible públicamente.

2.7. Modelo de pérdidas de trayectoria

Los modelos empíricos aplicados a esta tecnología se basan en el indicador RSSI del receptor, varios autores utilizan modelos de pérdidas de trayectoria logarítmicos o variaciones de los modelos exponenciales ITU-R y COST235 [27–31]. En los trabajos [32] y [30] combinan estas tendencias en el modelo de la Ecuación 2.3.

$$P_L(dB) = a + b \times \log(d) + X_\sigma \quad (2.3)$$

Donde a y b son ajustados mediante los valores obtenidos en las campañas de medición, X_σ representa la característica estocástica de la señal debido al ruido y desvanecimiento multitrayectoria, el factor exponencial de distancia es expresado por b ; mientras que a representa la potencia transmitida y la ganancia del sistema [32].

La aleatoriedad de la señal recibida es calculada con los datos medidos. Se asume X_σ como una variable estocástica con distribución normal, media cero y distribución estándar σ .

En todos los entornos inalámbricos, la potencia RSSI puede expresarse con la ecuación 2.4 [33].

$$R_P = T_P + G_t + G_r - PL \quad (2.4)$$

Donde:

- R_P = Potencia recibida por el transmisor dBm.
- T_P = Potencia transmitida dBm.
- G_t = Ganancia de la antena del transmisor dBi.
- G_r = Ganancia de la antena del receptor en dBi.
- PL = Pérdidas de trayectoria en dB.

2.8. Conclusiones

La tecnología de comunicación LoRa tiene la capacidad de solventar las necesidades de las WSN, dentro del paradigma del IoT.

El protocolo de red LoRaWAN provee clases y configuraciones que se pueden adaptar a las necesidades de las aplicaciones de IoT, por lo que su uso resulta conveniente en proyectos como *Aplicación de tecnologías inalámbricas al sistema de predicción de caudales en la cuenca del río Tomebamba* [9].

Los dispositivos LoRa de Clase A son los más apropiados para aplicaciones de WSN, por ser la clase con menor consumo energético aumentando la vida útil de cada nodo.

La creación de modelos de propagación LoRa para ambientes específicos son importantes, ya que el comportamiento y alcance de la red depende en gran medida de las condiciones y obstáculos de la zona de implementación.



Capítulo 3

Estado del Arte

Este capítulo presenta una recopilación de las principales aplicaciones y trabajos de investigación realizados sobre la capa física [LoRa](#), en conjunto con el protocolo de red con funciones [MAC LoRaWAN](#).

Si bien la aparición y generalización de [LoRaWAN](#) son recientes, se ha publicado una serie de trabajos con el objetivo de analizar y evaluar su desempeño en diferentes escenarios, por medio de aplicaciones en campo o por medio de simulaciones; además se proponen mejoras a la versión comercial de [LoRaWAN](#).

Se exponen los trabajos más relevantes en el área de las [WSN](#), así como trabajos que relacionen el tamaño de carga útil, altura de los equipos y potencia de transmisión con el alcance logrado por [LoRa](#).

3.1. Trabajos que analizan el desempeño de redes LoRaWAN

Desde una perspectiva teórica, los trabajos en [\[34–36\]](#) analizaron la capacidad de [LoRaWAN](#) en términos de escalabilidad y rendimiento de nodos. Todos estos trabajos concluyen que los sistemas [LoRaWAN](#) deben ser cuidadosamente configurados y dimensionados, con el objetivo de alojar una gran cantidad de dispositivos finales.

Se evaluó el impacto negativo de las interferencias dentro de redes [LoRaWAN](#) con gran cantidad de nodos[\[34\]](#), esto perjudica notablemente su escalabilidad. En [\[36\]](#) ofrece dos métodos para solucionar este problema: reducir el número de paquetes enviados por un nodo en el transcurso del día y aumentar el número de puertas de enlace, disminuyendo la carga de paquetes que maneja cada uno.

Diversos trabajos se han centrado en evaluar el rendimiento de redes [LoRaWAN](#) bajo diferentes condiciones ambientales y de propagación [\[21, 37–47\]](#), en cada una de ellas se recalca la importancia de la ubicación y elevación de la antena de la estación base, así como de los

obstáculos existentes en la transmisión. También se enfatiza la relevancia del SF con respecto a la cobertura de la red[48].

Varias aplicaciones de redes LoRaWAN en entornos urbanos [21, 42, 43] establecen un rango de transmisión óptima de alrededor de dos kilómetros, este valor aumenta dependiendo de los obstáculos y vegetación hasta 10 km en entornos suburbanos y rurales[46].

En [11] se realiza un primer análisis de propagación de LoRaWAN en ambientes forestales, concretamente en riveras de ríos ubicados en zonas urbanas, suburbanas y rurales. En el mismo se demuestra la correlación entre las mediciones de RSSI tomadas en ambas orillas de los ríos; en cuanto al rango de transmisión, establece un máximo de 700 metros para ambientes urbanos; 1100 metros para ambientes suburbanos y 1600 metros para ambientes rurales. El módulo LoRaWAN fue configurado con potencia máxima de 18.5 dBm y con una altura en los equipos de 1.4 metros.

En el trabajo propuesto por [49] se experimenta con drones como *gateway* LoRaWAN, propone una estrategia de comunicación basada en el estrés del área, el factor resiliente y el consumo de energía que aprovechan de la localización eficiente; la cobertura mejorada y la vigilancia de eficiencia energética con menos gastos generales, menor redundancia, y casi cero aislamientos. El enfoque propuesto es numéricamente simulado y los resultados muestran que puede conservar un máximo de 39.2 % y un mínimo de 12.6 % de la energía total de la red, junto con una mejora en el estrés del área entre 89.7 % y 53.0 %.

Otro experimento realizado fue el análisis de desempeño de LoRa en una granja de árboles[44], las redes de sensores en la agricultura pueden ser de gran ayuda para controlar el entorno y los cultivos en crecimiento; en el mismo se establece un porcentaje de obstrucción máxima permisible de la zona de Fresnel del 40 %, pero la obstrucción recomendada es del 20 % o menos. También se observa que en este ambiente, el porcentaje de paquetes recibidos se mantiene por encima del 90 % para alturas de antena de 1m, 2m y 3m, mientras que este valor llega al 24 % a nivel del suelo.

Los autores de [32] investigaron la cobertura de LoRaWAN en diferentes entornos colocando el dispositivo final a bordo de un automóvil y un bote. Se alcanzaron intervalos de cobertura de más de 10 km con una tasa de pérdida de paquetes no excesiva. Un trabajo más elaborado se desarrolló en [50], en el que los mismos autores extendieron sus mediciones y evaluaron el rendimiento del sistema en condiciones de movilidad. Desde una perspectiva de simulación, el trabajo en [51] se enfocó en escenarios vehiculares y examinó el desempeño de LoRaWAN en redes oportunistas vehiculares, mostrando mejores resultados en comparación con la tecnología WiFi.

3.2. Trabajos que proponen mejoras a LoRaWAN

Como ya se mencionó, LoRaWAN es un protocolo de red con funciones MAC de estándar abierto por lo que cualquier persona puede realizar modificaciones a la misma con el fin de

mejorarla. La estandarización de estas modificaciones esta a cargo de LoRa Alliance¹.

En [52] los autores presentaron una solución para mejorar la seguridad de un sistema de IoT basado en LoRaWAN. Esta propuesta empleó nodos proxy para realizar las operaciones criptográficas, con el fin de evitar el cómputo pesado en los nodos finales.

Los autores de [53] proponen un algoritmo Fair Adaptive Data Rate (FADR) para lograr una tasa de extracción de datos justa en LoRaWAN, mediante la explotación de combinaciones óptimas de factores de dispersión y niveles de potencia de transmisión. Al mismo tiempo, mantener la vida útil del nodo al no utilizar niveles de potencia de transmisión excesivamente altos. Mediante simulaciones de una red altamente congestionada lograron un 300 % más de imparcialidad que el enfoque de asignación de tiempo mínimo y un 22 % más de equidad que el enfoque de Brechts, que es uno de los enfoques más modernos.

Simultáneamente, el trabajo presentado en [54] integra IPv6 en LoRaWAN, de manera similar a IPv6 over Low power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN), lo que aumenta su interoperatividad con la red mundial.

El rápido desarrollo de redes móviles 5G ofrecerán una gran capacidad de tráfico, la cual se puede emplear como conexión troncal para LPWAN. Por lo tanto, existe la necesidad de integrar perfectamente LPWAN con el próximo 5G, los autores de [55] integraron estas tecnologías mediante el uso de *MultiConnect Conduit* como una puerta de enlace IoT integrada con el 5G Test Network (5GTN). Esta puerta de enlace es compatible con la tecnología LoRaWAN y con la red móvil para transmitir datos desde los nodos del sensor a una nube IoT.

3.3. Conclusiones

Los trabajos realizados sobre la tecnología LoRaWAN se basan en el análisis de rendimiento de la misma en diferentes ambientes y bajo diversas circunstancias de operación. Gran parte de estos recalcan la importancia que tiene la altura del *Gateway* y los obstáculos existentes con el alcance logrado por la red.

Varios autores recalcan la atenuación introducida por la vegetación, por lo que se espera que esto sea un factor destacado en el análisis en riveras de ríos donde la misma puede llegar a ser muy variada. En cuanto a las características adicionales para LoRaWAN resultan interesantes las propuestas de integración con tecnologías IPv6 y 5G, esto permitirá su adaptación con diversas aplicaciones y entrega la capacidad de conexión inalámbrica de alta velocidad a la red mundial.

¹LoRa Alliance - <https://loro-alliance.org/>



Capítulo 4

Metodología

En este capítulo se trata la metodología de manera técnica, mostrando las características de los dispositivos utilizados, la disposición física de los mismos, los ambientes elegidos y la metodología utilizada para las mediciones y su posterior análisis.

Se describe las configuraciones de equipos y métodos utilizados, con el objetivo de ser una guía para futuros trabajos y proveer replicabilidad en los resultados. Recalcando diferencias y características que podrían afectar a los datos obtenidos, respecto a los ambientes escogidos.

4.1. Descripción de Equipos

En esta sección se hace una breve descripción de los equipos utilizados en la campaña de mediciones, los valores de [RSSI](#), [SNR](#) y [PER](#) entregados fueron evaluados en el Apéndice [A](#). Adicionalmente se expone los dispositivos controladores, circuitos y estructuras utilizadas.

- **Kit de evaluación LoRa 900:** El kit de evaluación de red [LoRa](#) facilita a los clientes la prueba de esta tecnología, rango y velocidad de datos. La placa de acceso incluye una pantalla LCD, tarjeta SD para datos de configuración, conexión Ethernet, antena de 915 MHz y radios de captura de banda completa. También incluye dos placas Mote RN2903, estos equipos se exponen en la Figura [4.1](#).

La puerta de enlace usa una versión local del servidor de red [LoRaWAN](#) que se ejecuta en Windows, por lo que no necesita una conexión de red externa. Esto crea una red de demostración autónoma que permite evaluar las características de [LoRa](#) de una manera rápida y fácil.

- **LoRa Gateway:** [LoRa gateway](#) es una placa de demostración destinada al desarrollo de aplicaciones y productos que utilizan tecnologías [LoRa](#) RN, cuenta con una sección destinada a la comunicación con el servidor y otra sección de radio como se observa en la Figura [4.2](#). *Gateway LoRa* de Microchip permite la comunicación entre módulos, redes [LoRa](#) y servidores de aplicaciones compatibles. Los paquetes de enlace ascendente son

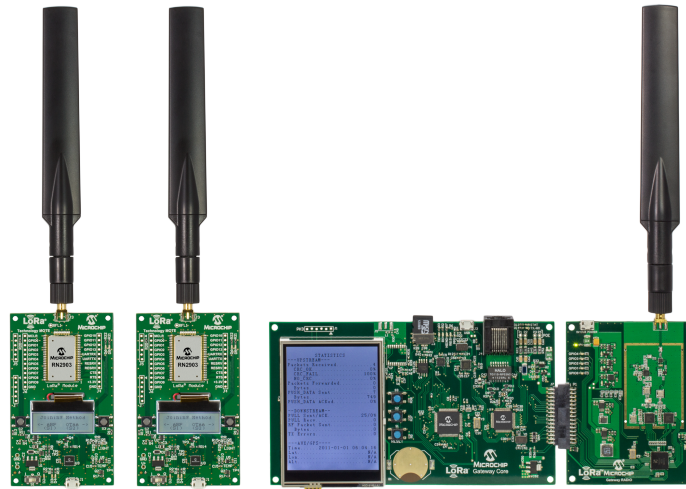


Figura 4.1: Kit de evaluación LoRa 900.[3]

emitidos de acuerdo con la especificación [LoRaWAN](#) que es capturada y reenviada por *gateway*.

Microchip suministra múltiples placas *gateway radio*, cada una con su propio diseño de banda de frecuencia de operaciones, para soportar los módulos Microchip RN disponibles. La comunicación con el servidor especificado se logra a través del protocolo TCP / IP compatible con el hardware de la placa de demostración.

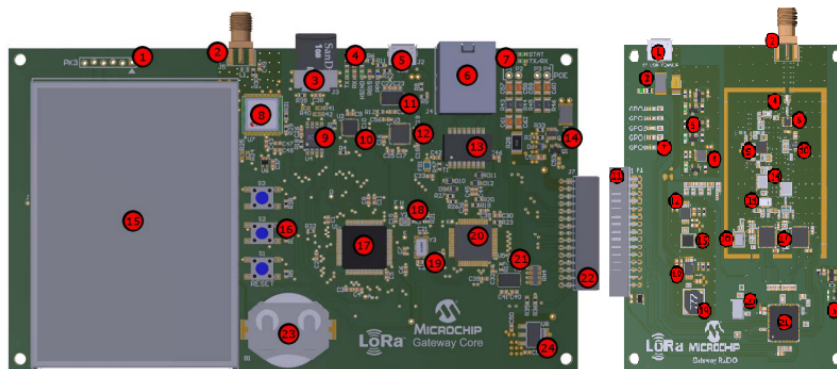


Figura 4.2: Gateway LoRa 900.[3]

- **RN2903 LoRa Mote:** Mote RN2903 [LoRa](#) es un dispositivo final [LoRaWAN](#) Clase A basado en el módulo RN2903, el cual se expone en la Figura 4.3. Como nodo autónomo alimentado por batería, proporciona una plataforma conveniente para demostrar

rápidamente la capacidad de largo alcance del módulo. Así como para verificar la interoperatividad cuando se conecta a las compuertas e infraestructura compatibles con [LoRaWAN](#).

El Mote incluye sensores de luz y temperatura para generar datos, los cuales se transmiten en un horario fijo o se inician presionando un botón. Una pantalla LCD proporciona información sobre el estado de la conexión. También cuenta con una interfaz USB estándar para la conexión a una computadora *host*, proporcionando un puente a la interfaz UART del módem RN2903. Al igual que con toda la familia de productos Microchip RN, permite una configuración y control rápidos de la pila de protocolos [LoRaWAN](#) a bordo, utilizando el conjunto de comandos ASCII de alto nivel.



Figura 4.3: RN2903 LoRa Mote [3]

- **Raspberry Pi 3 model B:** El Raspberry Pi es una computadora del tamaño de una tarjeta de crédito diseñada originalmente para educación, cuenta con menor capacidad de procesamiento que una laptop o computadora de escritorio moderna, pero sigue siendo una computadora Linux completa y puede proporcionar todas las capacidades esperadas que implica, con un bajo nivel de consumo de energía. En este trabajo se utilizaron dos Raspberry Pi model B, el primero se encarga de enviar los comandos [MAC](#) al módulo RN2903 y el segundo se encuentra implementado como un servidor de red.

4.2. Diagrama de bloques de la prueba

El sistema implementado sigue la arquitectura de una red [LoRaWAN](#), el cual se muestra en la Figura 4.4. El transmisor está constituido por un módulo [LoRaWAN](#) RN2903 y un Raspberry PI model B, conectados por una interfaz UART. Por otro lado el receptor cuenta con un [LoRa gateway](#) que transforma la información de la interfaz física [LoRa](#) en paquetes IPv4, los cuales envía al servidor web implementado en un segundo Raspberry PI model B.

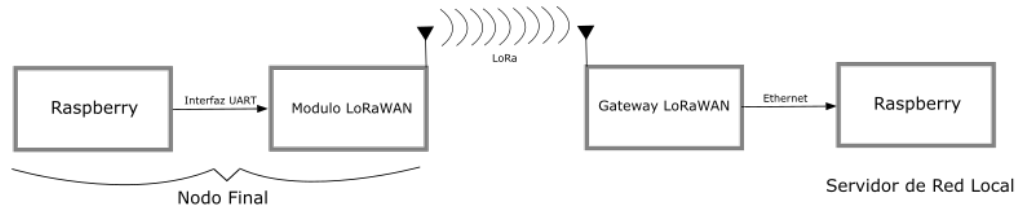


Figura 4.4: Diagrama de bloques de la prueba

4.3. Disposición y Configuración de los equipos

Los equipos son fáciles de movilizar y cuentan con autonomía energética, ya que las pruebas son realizadas en campo. Por estas razones se utilizó la estructura y disposición expuestas en la Figura 4.5, cada sistema Tx y Rx es alimentado por un *Power Bank* de 10000 mAh.

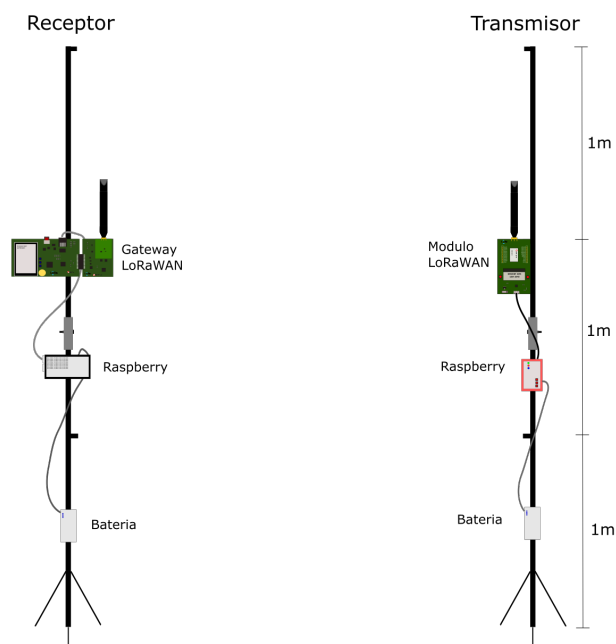


Figura 4.5: Disposición de los equipos

4.3.1. Configuración del Receptor

Dentro del módulo [LoRa gateway](#) se establece las direcciones de red para la interfaz hacia el servidor web, las mismas que se encuentran a continuación:

- **IP Módulo:** 192.168.1.125
- **IP Servidor(Raspberry):** 192.168.1.1
- **Máscara:** 255.255.255.0

Internamente en el Raspberry 3 del receptor corre un servidor creado en el lenguaje de programación Java, el cual recibe los paquetes IPv4 creados por el módulo [LoRa](#), descifra la carga útil y lo almacena en un archivo csv. El código utilizado se expone en el Apéndice [A](#).

4.3.2. Configuración del Transmisor

El Raspberry del transmisor cuenta con el circuito de control que se expone en la Figura [4.6](#), se utiliza para controlar la cantidad de paquetes a enviar y proporciona una referencia visual del tiempo de la prueba. El circuito se conecta al Raspberry por medio de la interfaz GPIO, la programación de estos puertos se la realiza a través de una implementación en Java, en el mismo se realizan las configuraciones del módulo [LoRa](#). Las configuraciones y programa utilizado se muestran en el Apéndice [A](#).

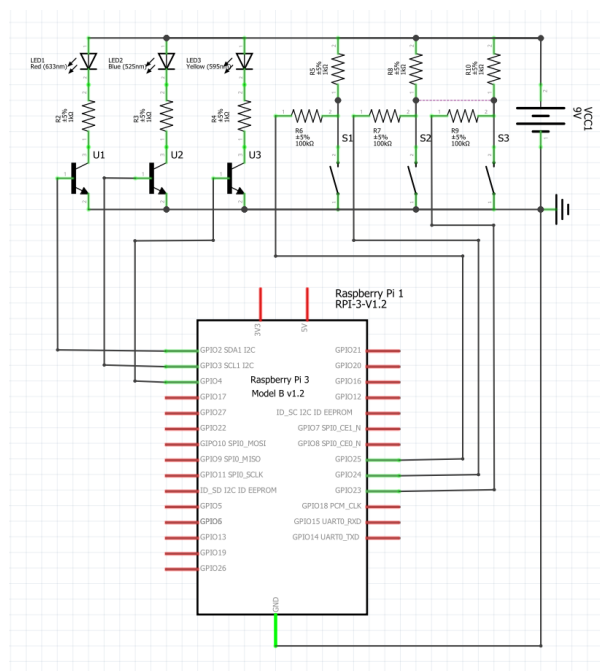


Figura 4.6: Circuito de control

4.4. Descripción del procedimiento

Las pruebas realizadas consisten en el envío de paquetes pre configurados desde el Mote hacia el servidor web del receptor, separados a una distancia fija. Se realizaron pruebas a 1, 2 y 3 metros, para determinar la variación de las métricas utilizadas ante esta variable. Las alturas a analizar corresponden al alto de la estructura que se utilizarían en los dispositivos limnigráficos. De igual forma se utilizarán 3 variaciones de tamaño de carga útil; la mínima de 2 bytes, máxima de 11 bytes y media de 7 bytes correspondientes a la capacidad de carga útil en una configuración de SF 10. En cuanto al SF, se utiliza las configuraciones de [11] para realizar una comparativa con los resultados obtenidos en dicho trabajo.

4.4.1. Cantidad de paquetes enviados e Intervalo de medición

Para la adquisición de datos se utilizó el proceso de medición por promediado espacial propuesto por [56] el mismo que fue utilizado en [11], de acuerdo con este procedimiento la separación entre medidas debe ser entre 20λ y 40λ ; para el caso de LoRaWAN en su especificación US902-928MHz la distancia recomendada está entre los 6.54 y 13.08 metros.

La cantidad de paquetes óptima para el análisis del PER es de 300 paquetes, este valor fue analizado en el Apéndice A, en estas pruebas se estableció que el tiempo necesario para enviar 300 paquetes es de 12 minutos.

4.4.1.1. Estimación de tiempos de medición

Si se envían 300 paquetes con una distancia de separación entre mediciones de 10 metros, tomando en cuenta que se realizarán 3 variaciones de tamaño de carga útil, 3 de altura de gateway, 2 de SF y estimando que el alcance de transmisión en estos ambientes rondará los 1200 metros se obtiene que el tiempo de la prueba será:

$$T = \frac{PY \times H \times SF \times \frac{Dis}{Sep} \times Amb \times Pkt \times 2,4}{3600} \quad (4.1)$$
$$T = \frac{3 \times 3 \times 2 \times \frac{1200}{10} \times 3 \times 300 \times 2,4}{3600}$$
$$T = 1296horas = 54dias$$

Donde :

- T = Tiempo de transmisión en horas.
- PY = Cantidad de variaciones de tamaño de carga útil.
- H = Cantidad de variaciones de altura.
- SF = Cantidad de variaciones de SF.
- Dis = Alcance de transmisión esperado.
- Sep = Separación entre medidas.

- Amb = Cantidad de ambientes a analizar.
- Pkt = Cantidad de paquetes enviados.

Debido al gran tiempo de transmisión previsto, se optó por extender la distancia de medición a 50 metros y reducir la cantidad de paquetes enviados a 50, por lo que el nuevo tiempo de transmisión será:

$$T = \frac{3 \times 3 \times 2 \times \frac{1200}{50} \times 3 \times 50 \times 2,4}{3600}$$
$$T = 43,2horas = 1,8dias$$

La reducción de paquetes no repercute en la fiabilidad de los datos en valores mayores a -110 dBm de [RSSI](#). Sin embargo, en valores menores y en puntos que se observen variaciones en los datos se enviarán 300 paquetes para aumentar la resolución del [PER](#).

4.5. Descripción de los Ambientes

Este trabajo se centra en el análisis de propagación en cuencas hidrográficas, se establecieron 3 ambientes cada uno correspondiente a una zona urbana, suburbana y rural de la provincia del Azuay como se muestra en la Figura 4.7. Se tomó como base los ambientes establecidos en [\[11\]](#).

Las zonas elegidas cuentan con diferencias muy marcadas de perfil y de vegetación, cada ambiente será descrito a continuación.

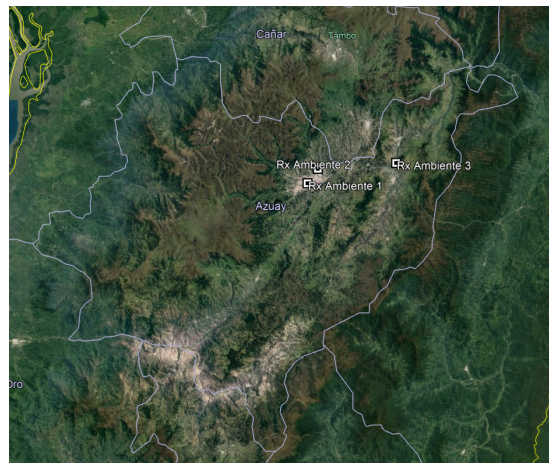


Figura 4.7: Localización de los ambientes en la provincia

- **Ambiente 1: Río Tomebamba:** Se escogió el río Tomebamba ya que cruza por el centro de Cuenca, este río es uno de los principales afluentes de la ciudad; el tramo escogido para el análisis se muestra en la Figura 4.8.

En esta zona el río mantiene una trayectoria lineal, contiene 2 puentes vehiculares de hormigón, un puente peatonal de hierro y varios miradores en su orilla. El perfil de elevación se muestra en la Figura 4.9, en algunos tramos los primeros 5 metros de orilla tienen una pendiente de 50° .

La vegetación consiste en su mayoría de arbustos de entre 1 y 2 metros y árboles pequeños cuyas copas se empiezan a los 2 metros de altura.

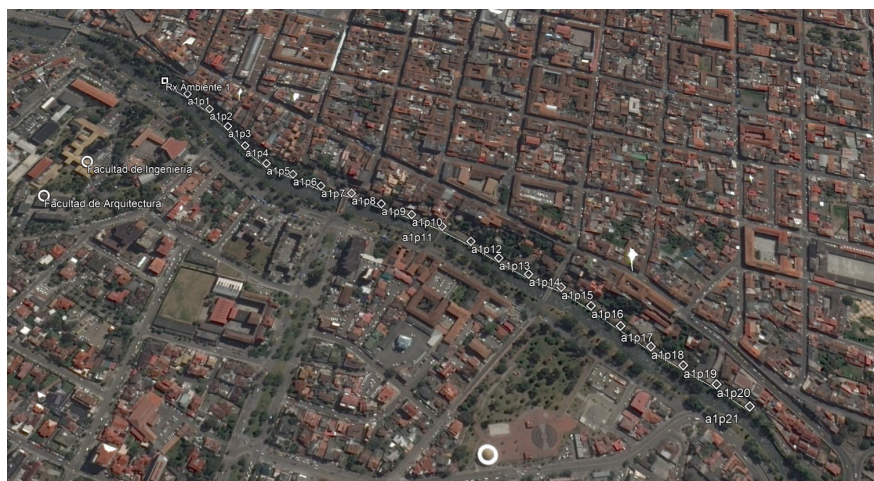


Figura 4.8: Ambiente 1: Río Tomebamba

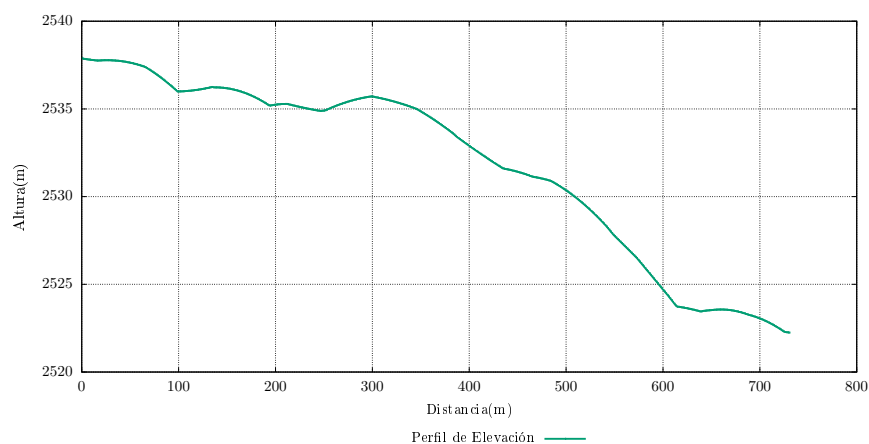


Figura 4.9: Perfil de elevación río Tomebamba

- **Ambiente 2: Río Machángara:** El río Machángara se encuentra al este en una zona de expansión de la ciudad, al igual que en el ambiente 1 la trayectoria del río se mantiene lineal en la zona. Su perfil de elevación se muestra en la Figura 4.11, la orilla se mantiene plana en todo el trayecto. En cuanto a la vegetación predominan sectores con árboles de eucalipto, seguidos de zonas sin vegetación; cabe recalcar que este trayecto forma parte de un parque lineal.



Figura 4.10: Ambiente 2: Río Yanuncay

- **Ambiente 3: Río Paute:** La zona escogida se encuentra a 5 minutos de la ciudad de Paute en el sector La Higuera. El río cuenta con una trayectoria lineal y su orilla se mantiene plana en el tramo de medición, en cuanto a la vegetación predominan arbustos de hasta 1.5 metros de altura y árboles de tamaño medio de 5 metros.

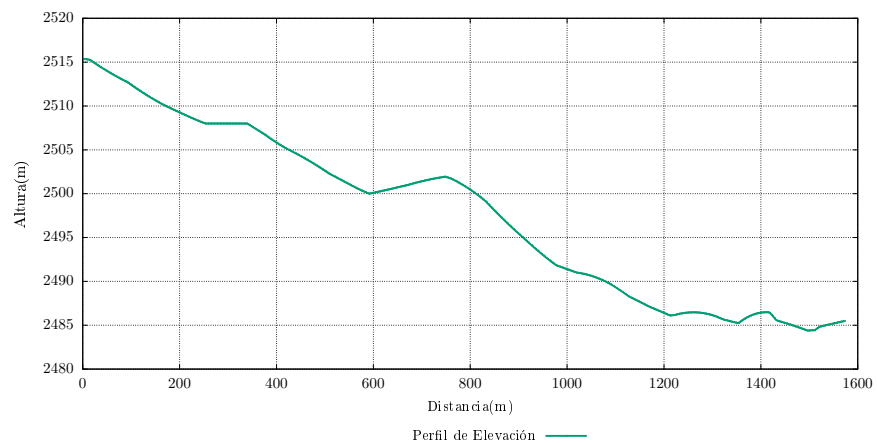


Figura 4.11: Perfil de elevación río Machangara



Figura 4.12: Ambiente 3: Río Paute

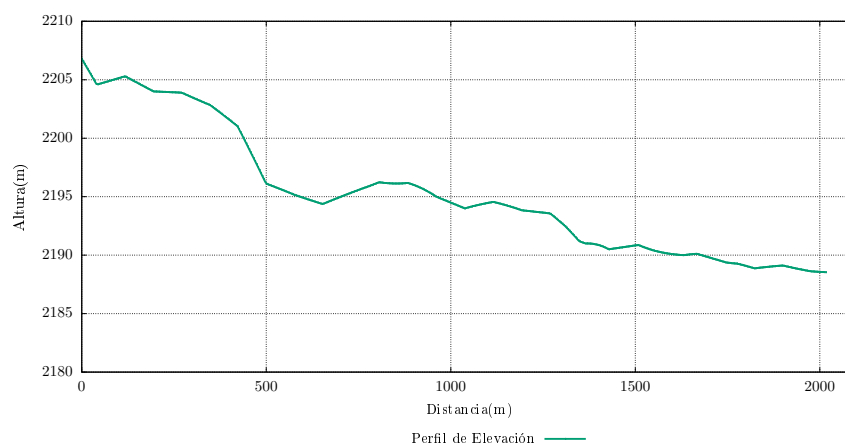


Figura 4.13: Perfil de elevación río Pauta

4.6. Comparación estadística de las campañas de medición y modelo de propagación

Como se analizó en el Apéndice A, los valores de RSSI menores a -110 dBm no son confiables, por esta razón se descartarán dichos valores para el análisis estadístico de los ambientes y ajuste de modelo de pérdidas de trayectoria.

Para definir si los valores obtenidos con diferentes configuraciones guardan una relación significativa, se usa la prueba de Kruskal-Wallis. Si la hipótesis de que todas las configuraciones tienen la misma distribución resulta falsa, se realiza la prueba de Dunn la cual identifica qué configuraciones específicas son significativas de las demás[57]. El modelo empírico a utilizar se expone en la Sección 2.7.

4.7. Conclusión

El kit de evaluación LoRa 900 ofrece la configuración de los parámetros escogidos en este estudio, si bien el mote LoRa permite la adición de sensores según la necesidad del usuario, no se considera indispensable su uso para una aplicación final. La transmisión LoRa es realizada por el módulo RN2903, el cual es controlado por medio de una interfaz UART que puede ser usado por diversos dispositivos como: arduino, raspberry, PIC's, etc.

Los ambientes escogidos ofrecen una diversidad forestal y poblacional acordes a ambientes urbanos, suburbanos y rurales analizados en trabajos relacionados. En adición los lugares escogidos resultan óptimos e interesantes para el establecimiento de una red de sensores limnigráficos que ayuden al monitoreo en tiempo real del caudal de los mismos.



Capítulo 5

Resultados

Este capítulo expone el análisis de los datos obtenidos en las campañas de mediciones de diferentes tipos de ambientes y el ajuste de los mismos a un modelo empírico de pérdidas de trayectoria. En este capítulo se abarca los resultados y análisis de los datos de [RSSI](#), [SNR](#) y [PER](#) obtenidos de las mediciones realizadas en los ambientes descritos en la Sección 4.5, tal como se mencionó en la Sección 4.4 se realizará la comparación estadística entre variaciones de configuración y variaciones de alturas para determinar si es necesario modificar el modelo de pérdidas de trayectoria con dichas variables.

Una vez realizada la comparación estadística se ajustarán los datos de cada ambiente al modelo de propagación propuesto, los valores de [RSSI](#) usados son mayores a -110 dBm para asegurar su validez tal como se establece en el Apéndice A.

Para finalizar se comparan los resultados del modelo de pérdidas de trayectoria y resultados de las pruebas estadísticas para confirmar o descartar la relación existente entre ambientes expuesto en el trabajo [11].

5.1. Mediciones de RSSI, SNR y PER

Los resultados de las campañas de mediciones en cada ambiente se exponen en el Apéndice B, por cada ambiente se obtuvieron 18 curvas correspondientes a las variaciones de configuración expuestas en la Sección 4.4, cada punto representa la media e intervalo de confianza del 95 % de los valores medidos en el campo.

En las Figuras B.1, B.6 y B.11 se muestran los valores de [RSSI](#) para todas las configuraciones en cada ambiente; en general, se puede observar una mejora del [RSSI](#) en los primeros metros de la transmisión al aumentar la altura de los equipos [LoRa](#). Tal como se esperaba por lo concluido en Apéndice A, los valores de [RSSI](#) se mantienen constantes en un valor de -110 dBm al llegar a cierta distancia de transmisión, esta distancia depende del ambiente estudiado.

En cuanto al [SNR](#), se noto que los resultados tomaban valores por debajo de los 3 dB desde

la misma distancia en la que se observó un valor constante de [RSSI](#), lo cual se observa en las Figuras [B.3](#), [B.8](#) y [B.13](#). Por otro lado, el [PER](#) en cada ambiente se mantiene por debajo del 10 % hasta una distancia de 500 metros en el río Tomebamba y 1200 metros en los ríos Machángara y Paute, una vez llegado a esta distancia se observa un aumento exponencial del [PER](#), esto se puede observar en las Figuras [B.4](#), [B.9](#) y [B.14](#).

5.2. Comparación estadística de las campañas de medición

Como se indicó en la Sección [4.6](#), se realizó el *test* de Kruskal-Wallis y el *test* de Dunn¹ entre las variaciones de configuración de cada ambiente para determinar si se requiere un ajuste al modelo tomando en consideración el tamaño de carga útil, altura del *gateway* y [SF](#).

5.2.1. Comparación estadística del Río Tomebamba

Los resultados del *test* de Dunn para las variaciones de [SF](#) y tamaño de carga útil en cada altura analizada se exponen en las Tablas [5.1](#), [5.2](#) y [5.3](#).

Tabla 5.1: Valores P del *test* de Dunn Río Tomebamba 1m

Valor P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.3441				
SF10-PL11	0.3607	0.4825			
SF7-PL2	0.1781	0.2936	0.2797		
SF7-PL7	0.1383	0.2403	0.2278	0.4396	
SF7-PL11	0.1309	0.2299	0.2177	0.4272	0.4874

Tabla 5.2: Valores P del *test* de Dunn Río Tomebamba 2m

Valor P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.4824				
SF10-PL11	0.3981	0.4157			
SF7-PL2	0.4155	0.4328	0.4843		
SF7-PL7	0.4270	0.4444	0.4723	0.4883	
SF7-PL11	0.4648	0.4824	0.4335	0.4502	0.4619

Se observa que todas las combinaciones rechazan la hipótesis nula por lo que se puede afirmar que existe una relación entre las campañas de mediciones, se verificó el efecto del resultado del *test* de Dunn en la generación del modelo de pérdidas, los resultados del modelo para diferentes

¹El *test* de Dunn considera poblaciones diferentes o no relacionadas cuando el resultado del valor P entre dichas poblaciones es menor a 0.01

Tabla 5.3: Valores P del *test* de Dunn Río Tomebamba 3m

Valor P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.4420				
SF10-PL11	0.3144	0.3660			
SF7-PL2	0.4572	0.4866	0.3579		
SF7-PL7	0.4657	0.4780	0.3501	0.4917	
SF7-PL11	0.4572	0.4866	0.3579	0.5000	0.4917

valores P se muestran en la Figura 5.1, en ellas se nota que la variación de alcance tomando en cuenta el nivel de sensibilidad teórico fluctúa entre 5 y 80 metros, de este modo se considera innecesario una distinción del SF y carga útil al modelo de pérdidas de trayectoria propuesto en 2.7.

Considerando las configuraciones de SF y carga útil a una misma altura como parte de la misma población de análisis, se obtiene los valores P del *test* de Dunn que se muestran en la Tabla 5.4 y los modelos que se generados en la Figura 5.3.

Tabla 5.4: Valores P del Test de Dunn Río Tomebamba entre alturas

Valor P	1m	2m
2m	0.0076	
3m	0.0155	0.4214

Se puede notar que existe de 5 a 8 dBm de diferencia en el RSSI entre alturas a una misma distancia de transmisión hasta el punto de alcance máximo de 900m. Si bien los resultados del *test* de Dunn sugieren una diferencia notable entre la altura de 1m y las demás alturas, la variación de RSSI entre alturas no excede los 8 dB hasta alcanzar la distancia máxima de transmisión obtenida en la campaña de medición.

5.2.2. Comparación estadística del Río Machángara

Los resultados del *test* de Dunn para las variaciones de SF y tamaño de carga útil en cada altura analizada se exponen en las Tablas 5.5, 5.6 y 5.7.

Tabla 5.5: Valores P del *test* de Dunn Río Machangara 1m

Valor P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.4270				
SF10-PL11	0.4922	0.4347			
SF7-PL2	0.2871	0.2278	0.2804		
SF7-PL7	0.3610	0.2946	0.3537	0.4183	
SF7-PL11	0.4212	0.3509	0.4136	0.3582	0.4376

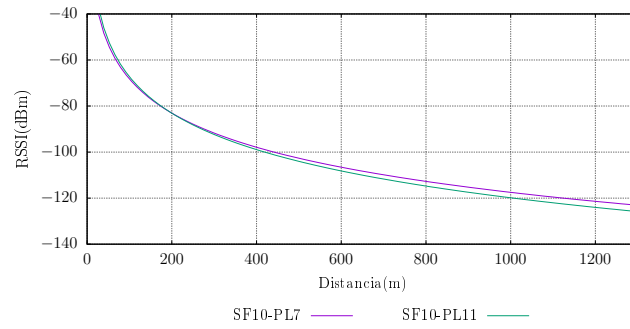
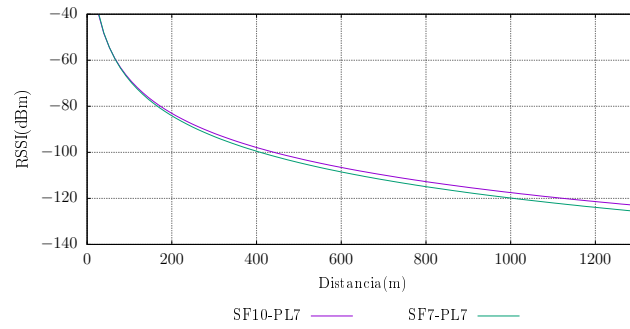
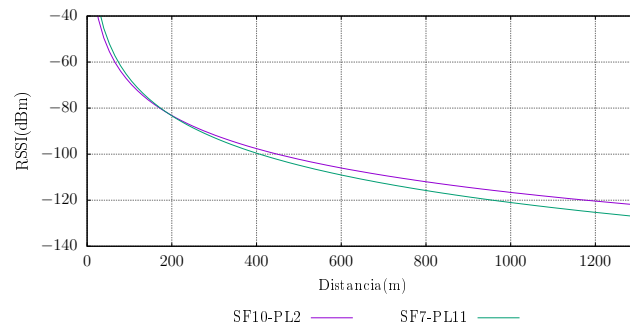
(a) $P=0.4825$ (b) $P=0.0.2403$ (c) $P=0.1309$ Figura 5.1: Modelos para diferentes valores P

Tabla 5.6: Valores P del *test* de Dunn Río Machangara 2m

Valor P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.3249				
SF10-PL11	0.4135	0.2506			
SF7-PL2	0.3564	0.4658	0.2788		
SF7-PL7	0.4912	0.3329	0.4050	0.3647	
SF7-PL11	0.4853	0.3118	0.4279	0.3428	0.4765

Tabla 5.7: Valores P del *test* de Dunn Río Machángara 3m

Valor P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.2006				
SF10-PL11	0.2315	0.4580			
SF7-PL2	0.4834	0.1891	0.2190		
SF7-PL7	0.3889	0.2887	0.3258	0.3730	
SF7-PL11	0.4697	0.1800	0.2090	0.4863	0.3601

Como se esperaba, las variaciones de configuración en una misma altura están relacionadas por lo que también es innecesario modificar el modelo de pérdidas de trayectoria para este ambiente. Los valores P obtenidos del *test* de Dunn entre las diferentes alturas se muestran en la Tabla 5.8. Los valores P rechazan la hipótesis nula por lo que no existe diferencias notables en los valores de RSSI que requieran una modificación al modelo de propagación.

Tabla 5.8: Valores P del *test* de Dunn Río Machángara entre alturas

Valor P	1m	2m
2m	0.2288	
3m	0.2469	0.0768

5.2.3. Comparación estadística del Río Paute

Los resultados del *test* de Dunn para las variaciones de SF y tamaño de carga útil en cada altura analizada se exponen en las Tablas 5.9, 5.10 y 5.11. Al igual que en el ambiente 1 y 2, los valores P del *test* de Dunn rechazan la hipótesis nula ante las variaciones de SF y tamaño de carga útil.

Los valores P obtenidos del *test* de Dunn entre las diferentes alturas se muestran en la Tabla 5.12. Los valores P rechazan la hipótesis nula por lo que no existe diferencias notables en los valores de RSSI que requieran una modificación al modelo de propagación.

Tabla 5.9: Valores P del *test* de Dunn Río Paute 1m

Valor P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.4922				
SF10-PL11	0.4747	0.4825			
SF7-PL2	0.3756	0.3682	0.3518		
SF7-PL7	0.3682	0.3609	0.3446	0.4922	
SF7-PL11	0.4361	0.4284	0.4112	0.4380	0.4303

Tabla 5.10: Valores P del *test* de Dunn Río Paute 2m

Valor P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.4018				
SF10-PL11	0.3849	0.4825			
SF7-PL2	0.3286	0.2443	0.2307		
SF7-PL7	0.4728	0.3756	0.3591	0.3536	
SF7-PL11	0.4883	0.4131	0.3961	0.3181	0.4611

Tabla 5.11: Valores P del *test* de Dunn Río Paute 3m

Valor P	SF10-PL2	SF10-PL7	SF10-PL11	SF7-PL2	SF7-PL7
SF10-PL7	0.4728				
SF10-PL11	0.4786	0.4515			
SF7-PL2	0.3428	0.3682	0.3233		
SF7-PL7	0.3999	0.4265	0.3793	0.4399	
SF7-PL11	0.3518	0.3775	0.3321	0.4903	0.4496

Tabla 5.12: Valores P del *test* de Dunn Río Paute entre alturas

Valor P	1m	2m
2m	0.3404	
3m	0.1853	0.0957

5.2.4. Comparación estadística entre ambientes

Si bien los resultados del *test* de Dunn en el ambiente 1 expuestos en la Tabla 5.4 denotan diferencias entre las alturas, si observamos la trayectoria del modelo de RSSI de la Figura 5.3 podemos observar que son muy similares hasta hasta la distancia máxima de 900 metros encontrado en la práctica, por lo que se usarán los valores obtenidos de todas las alturas en cada ambiente para la comparación, los resultados de la prueba de Dunn entre ambientes se muestra en la Tabla 5.13. Los valores P del *test* de Dunn entre los ambientes suburbano y rural con el ambiente urbano rechazan la hipótesis nula denotando una relación entre los ambientes 2 y 3.

Tabla 5.13: Valores P del *test* de Dunn entre Ambientes

Valor P	Río Tomebamba	Río Machángara
Río Machángara	0.0076	
Río Paute	0.0155	0.4214

5.3. Valores promedio y ajuste logarítmico de RSSI

Como se demostró en la Sección 5.2, no es necesario distinguir los diferentes SF y tamaño de carga útil en el modelo de pérdidas de trayectoria descrito en la Sección 2.7 sin embargo el *test* de Dunn denotó una diferencia entre el RSSI a diferentes alturas de *gateway* por lo que se estimará un modelo de pérdidas de trayectoria por cada altura analizada. Por cada altura se usarán los valores promedio de RSSI de todas las variaciones de configuración para la estimación del modelo los cuales se presentan a continuación.

5.3.1. Valores promedio de RSSI con su ajuste logarítmico para el Río Tomebamba

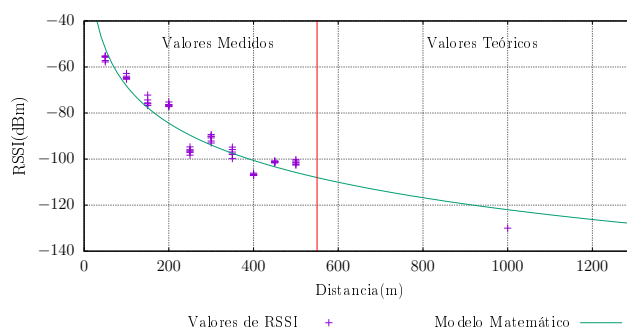
Como se describe en el Capítulo 4 los valores menores a -110 dBm son descartados, sin embargo se adiciona un punto con un RSSI de -130 dBm correspondiente a la sensibilidad teórica de una transmisión LoRa con SF 10 expuesta en la Tabla 2.1 en la distancia de transmisión máxima, se utilizará la Ecuación 2.3 para el ajuste de los datos de RSSI. Los valores de RSSI promedio a usar para cada altura se presentan en la Figura 5.2, las constantes resultados del ajuste de datos se muestra en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14: Constantes del modelo de RSSI para el Río Tomebamba

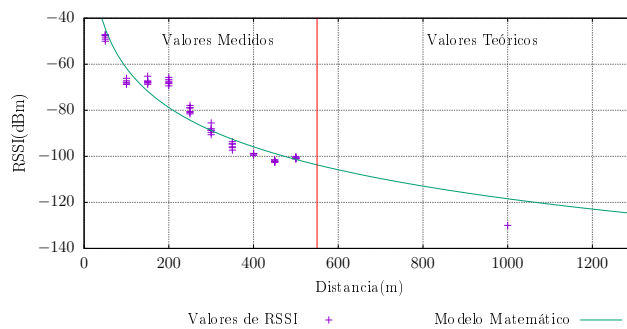
Alturas	a	b	σ
1m	39.21639	-23.2431	4.8068
2m	51.69	-24.6276	5.204
3m	80.0861	-30.1213	5.3318

5.3.2. Valores promedio de RSSI con su ajuste logarítmico para el Río Machángara

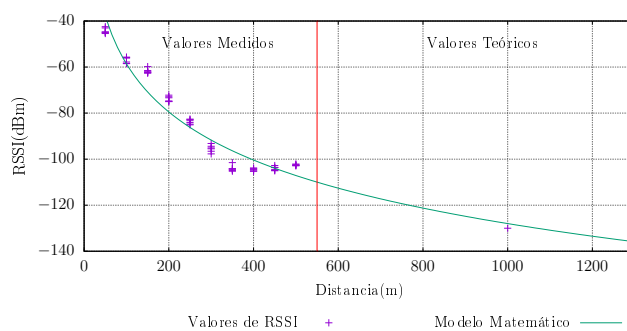
Los valores de RSSI promedio a usar para cada altura se presentan en la Figura 5.4, las constantes que resultaron del ajuste de datos se muestra en la Tabla 5.15.



(a) 1m de altura



(b) 2m de altura



(c) 3m de altura

Figura 5.2: Valores de RSSI promedio en el Río Tomebamba

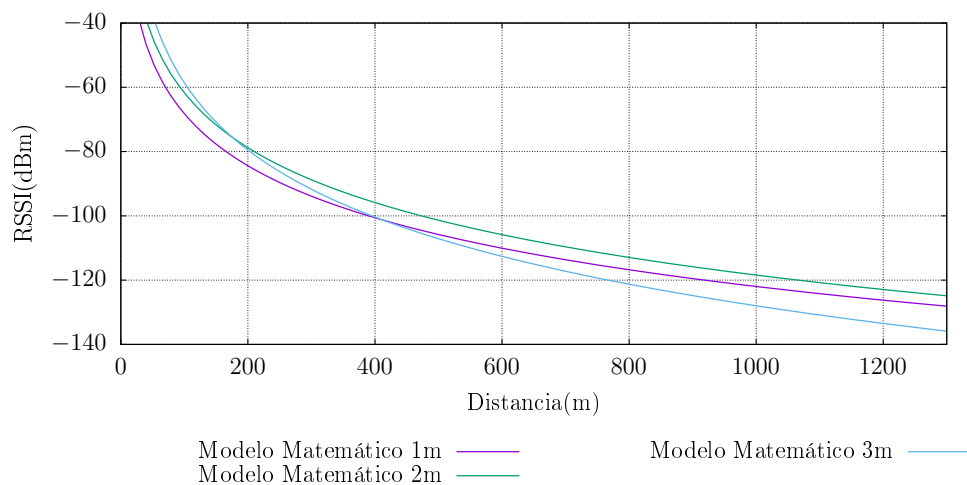


Figura 5.3: Comparación de modelos RSSI en el Río Tomebamba

Tabla 5.15: Constantes del modelo de RSSI para el Río Machángara

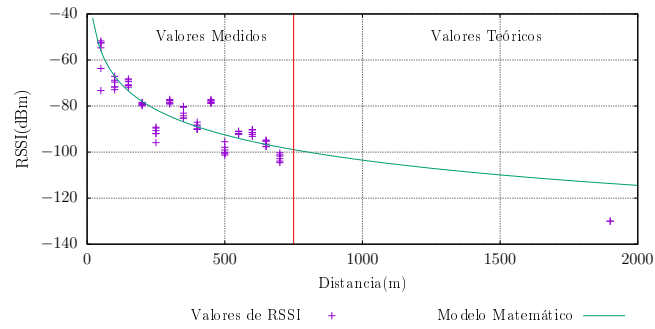
Alturas	a	b	σ
1m	5.8798	-15.8332	6.5146
2m	33.6205	-21.1682	4.4442
3m	25.5524	-19.0691	4.0624

5.3.3. Valores promedio de RSSI con su ajuste logarítmico para el Río Paute

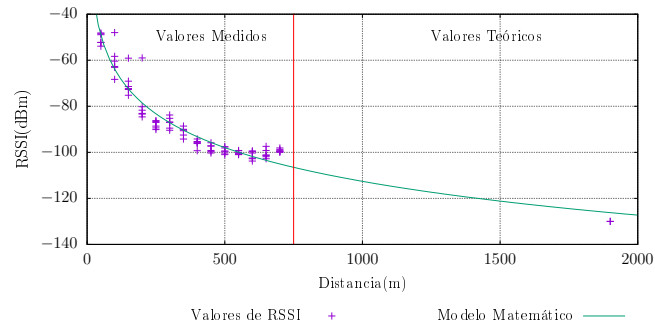
Los valores de RSSI promedio a usar para cada altura se presentan en las Figuras 5.6, las constantes que resultaron del ajuste de datos se muestra en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16: Constantes del modelo de RSSI para el Río Paute

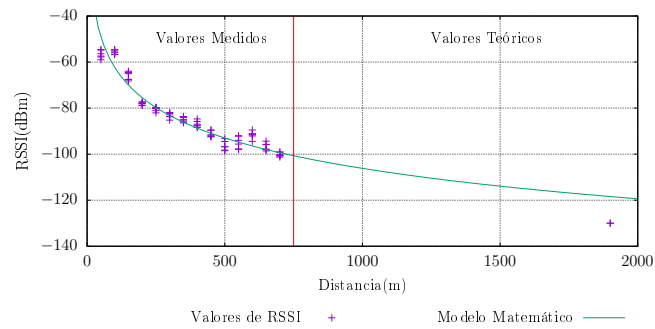
Alturas	a	b	σ
1m	26.77	-20.0753	5.7657
2m	37.5653	-21.9226	5.9105
3m	39.901	-22.6676	5.73



(a) 1m de altura



(b) 2m de altura



(c) 3m de altura

Figura 5.4: Valores de RSSI promedio en el Río Machángara

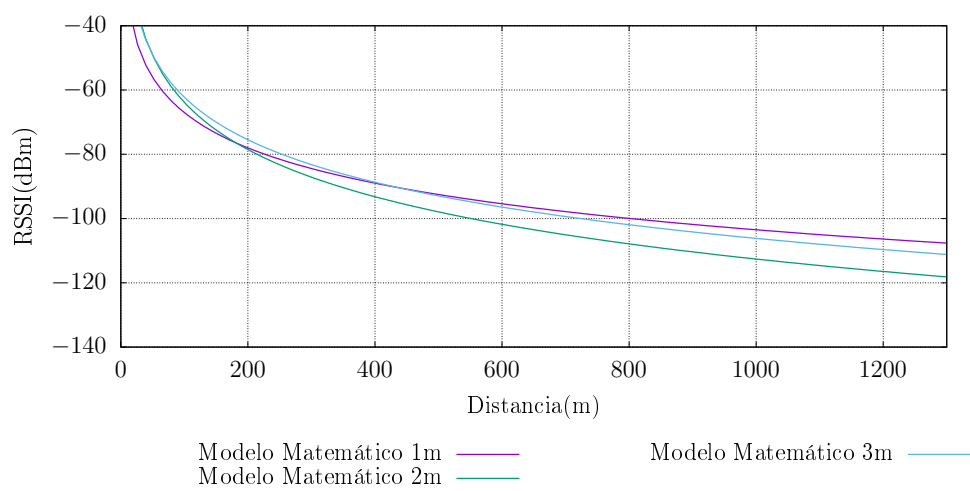
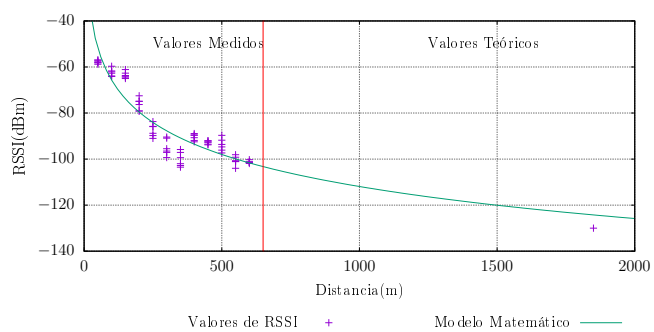
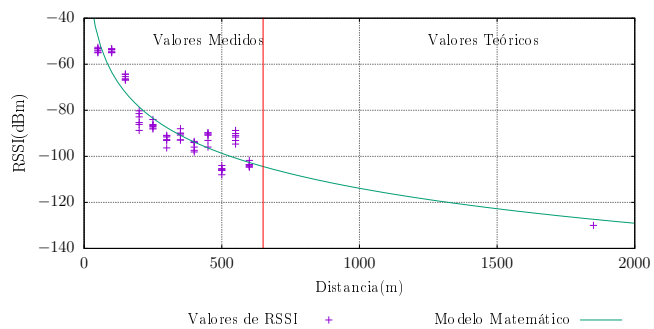


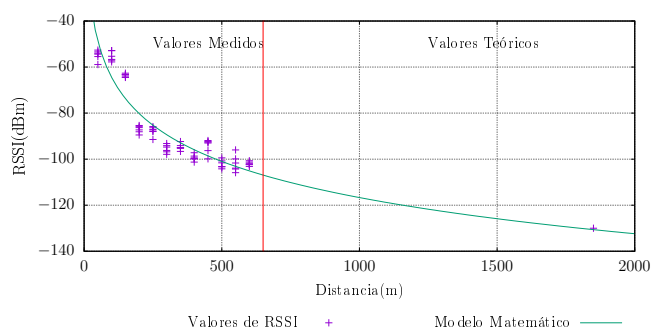
Figura 5.5: Comparación de modelos RSSI en el Río Machángara



(a) 1m de altura



(b) 2m de altura



(c) 3m de altura

Figura 5.6: Valores de RSSI promedio en el Río Paute

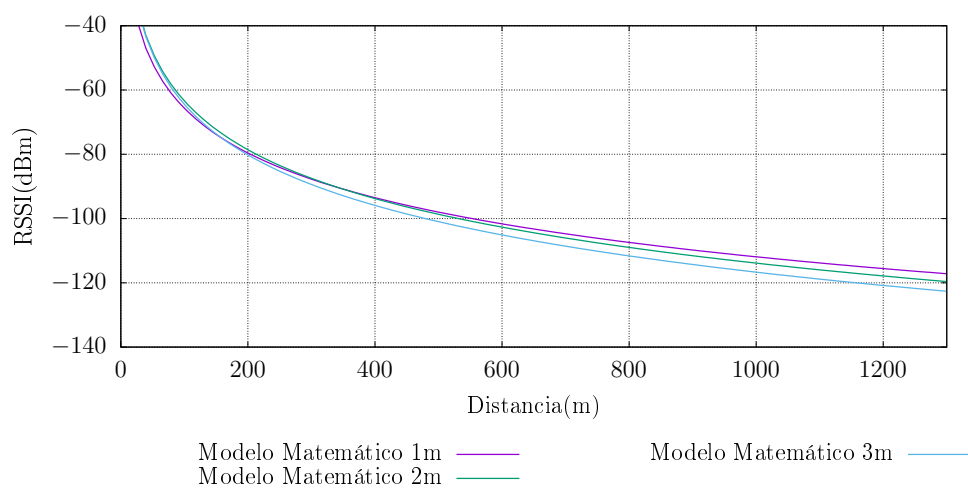


Figura 5.7: Comparación de modelos RSSI en el Río Paute

5.4. Generación del modelo de pérdidas de trayectoria

Como se indicó en la Sección 2.7, el modelo de pérdidas de trayectoria se basa en la Ecuación 2.3, para realizar dicho ajuste se debe calcular las pérdidas de trayectoria en cada punto utilizando la Ecuación 2.4, los valores de las constantes utilizadas se muestran en la Tabla 5.17.

Tabla 5.17: Valores utilizados para el cálculo de las pérdidas de trayectoria

Constante	Valor
T_P	18.43 dBm
G_t	0.2 dBi
G_r	0.2 dBi

Con el uso del modelo de pérdidas de trayectoria se puede analizar el comportamiento del RSSI y el alcance máximo para las diferentes potencias del transmisor expuestas en el Apéndice A.

5.4.1. Modelo de pérdidas de trayectoria para el Río Tomebamba

Los valores de pérdida de trayectoria con su respectivo ajuste para cada altura se presentan en la Figura 5.8, los valores constantes resultado del modelo matemático se muestra en la Tabla 5.18.

Tabla 5.18: Constantes del modelo de RSSI para el Río Tomebamba

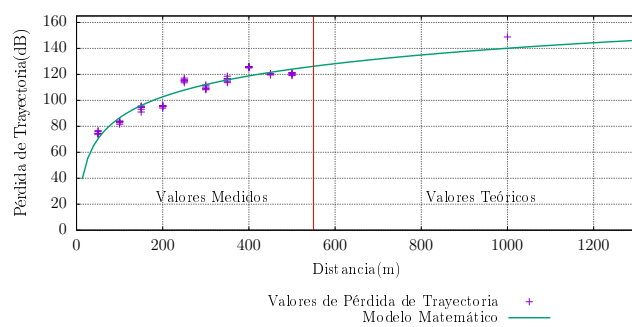
Alturas	a	b	σ
1m	-20.4339	23.2431	4.8068
2m	-32.86	24.6276	5.204
3m	-48.6488	27.4843	14.4701

5.4.2. Modelo de pérdidas de trayectoria para el Río Machángara

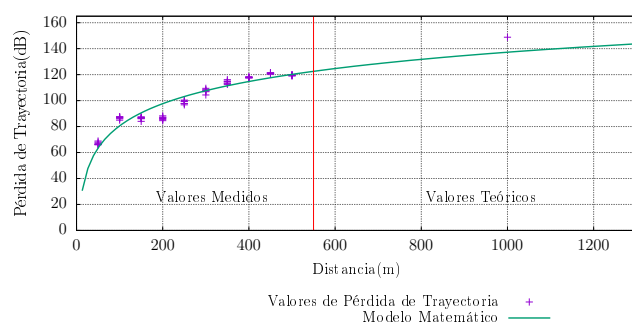
Los valores de pérdida de trayectoria con su respectivo ajuste para cada altura se presentan en las Figuras 5.9, los valores constantes resultado del modelo matemático se muestra en la Tabla 5.19.

Tabla 5.19: Constantes del modelo de RSSI para el Río Machángara

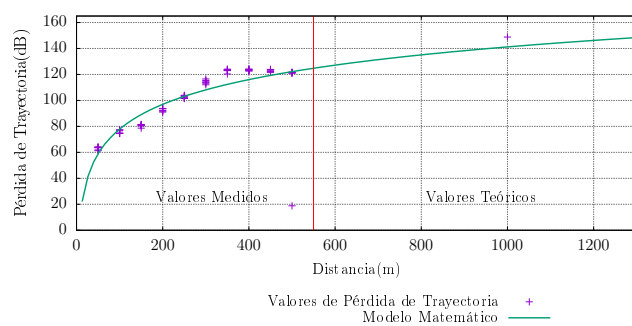
Alturas	a	b	σ
1m	12.9502	15.8332	6.5146
2m	-14.7905	21.1682	4.4442
3m	-6.7224	19.0691	4.0624



(a) 1m de altura

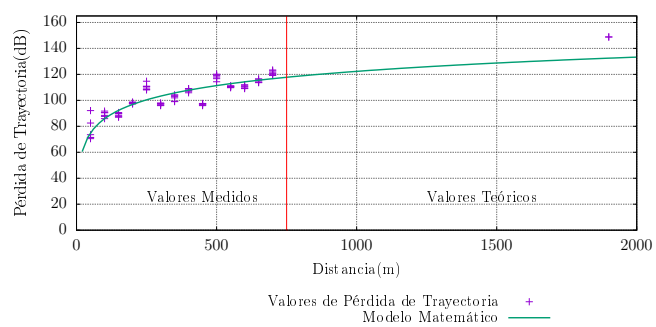


(b) 2m de altura

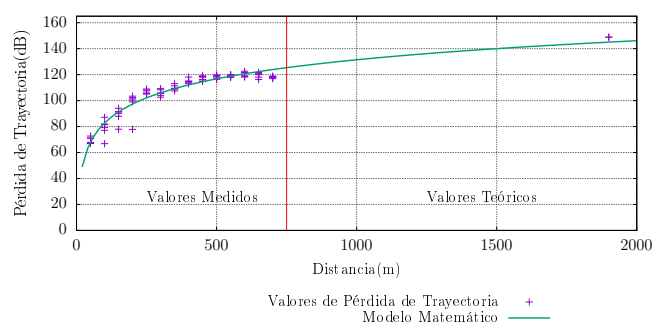


(c) 3m de altura

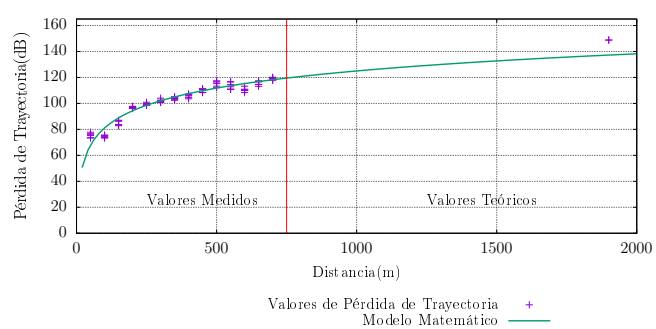
Figura 5.8: Modelo de Pérdidas de trayectoria del Río Tomebamba



(a) 1m de altura



(b) 2m de altura



(c) 3m de altura

Figura 5.9: Modelo de Pérdidas de trayectoria del Río Machángara

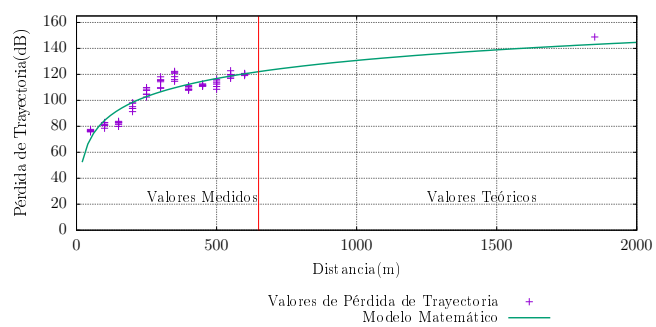


5.4.3. Modelo de pérdidas de trayectoria para el Río Paute

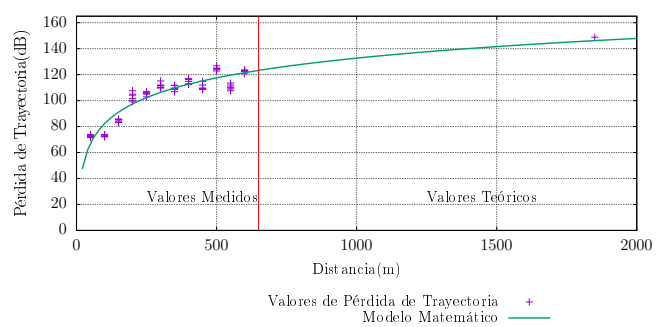
Los valores de pérdida de trayectoria con su respectivo ajuste para cada altura se presentan en las Figuras 5.10, los valores constantes resultado del modelo matemático se muestra en la Tabla 5.20.

Tabla 5.20: Constantes del modelo de RSSI para el Río Paute

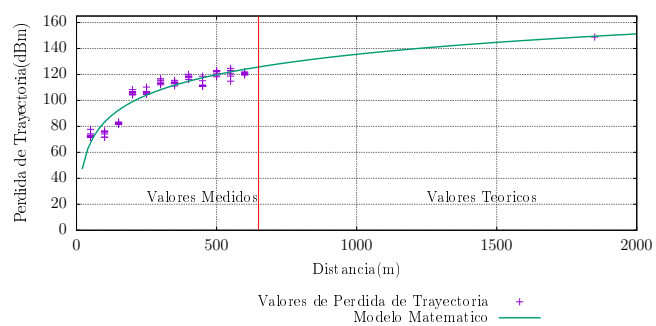
Alturas	a	b	σ
1m	-7.9411	20.0753	5.7657
2m	-18.7353	21.9226	5.9105
3m	-21.071	22.6676	5.73



(a) 1m de altura



(b) 2m de altura



(c) 3m de altura

Figura 5.10: Modelo de Pérdidas de trayectoria del Río Paute

5.5. Comparación de modelos de pérdidas de trayectoria

Una vez obtenidos los valores para el modelo de pérdidas de trayectoria en cada ambiente, se pueden comparar dichos valores para determinar alguna relación entre la altura y la distancia de transmisión máxima, los modelos de pérdidas de trayectoria para todos los ambientes se muestran en la Figura 5.11.

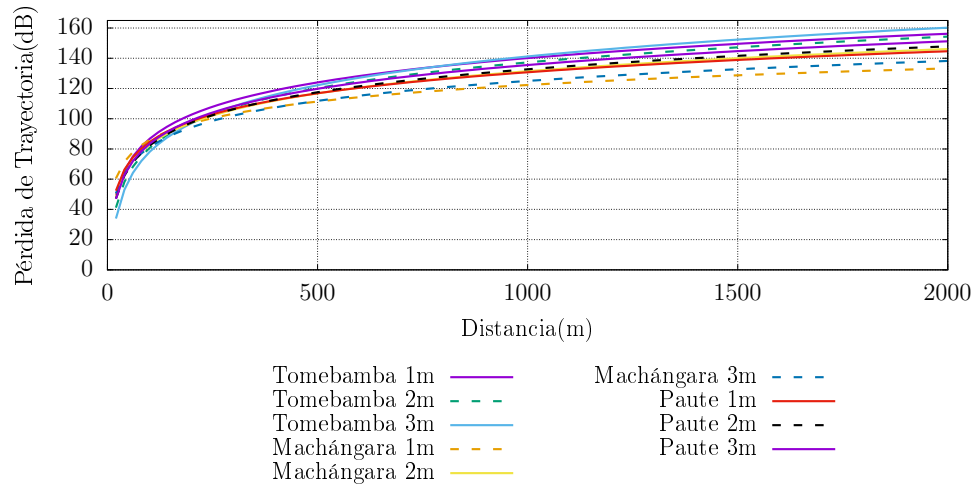


Figura 5.11: Comparación de pérdidas de trayectoria entre ambientes

Observando los valores de las constantes a y b del modelo de pérdidas de trayectoria para cada ambiente expuestas en las Tablas 5.18, 5.19 y 5.20 podemos notar una variación lineal con respecto a la altura en la constante a , ajustando estos valores a la ecuación de la recta $a + b(x)$ se obtuvieron los valores mostrados en la Tabla 5.21 y que se representan en la Figura 5.12.

Tabla 5.21: Valores del modelo lineal para la constante a

Alturas	a_1	b_1
Tomebamba	-5.766	-14.1074
Machángara	16.8184	-9.8363
Paute	-2.7859	-6.5649

De forma similar, ajustando linealmente los valores de la constante b del modelo de propagación se obtienen los valores expuestos en la Tabla 5.22 y que se observan en la Figura 5.13.

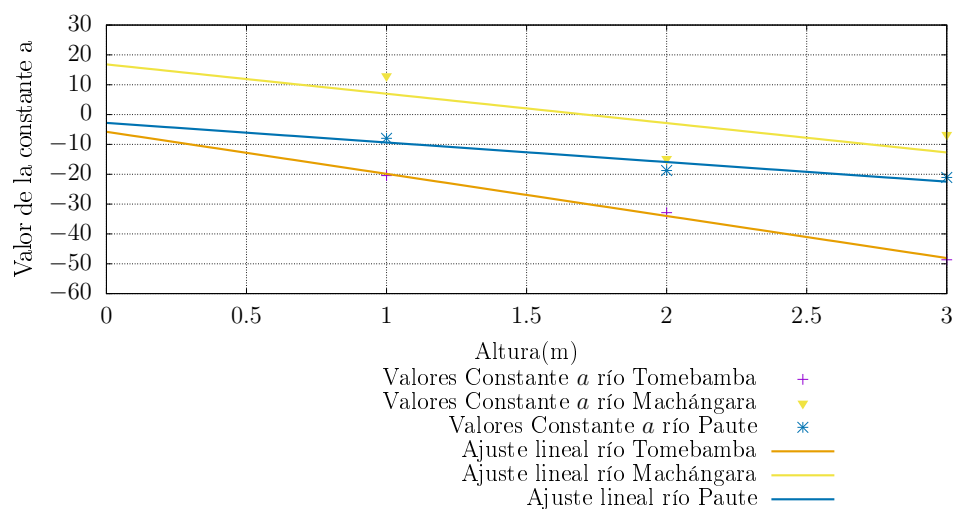


Figura 5.12: Ajuste lineal de la constante a del modelo de pérdidas de trayectoria

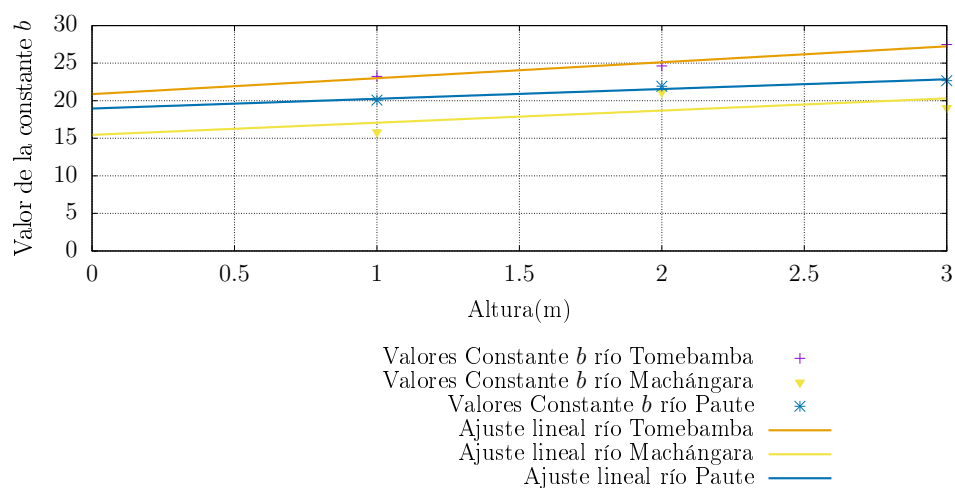


Figura 5.13: Ajuste lineal de la constante b del modelo de pérdidas de trayectoria

Tabla 5.22: Valores del modelo lineal para la constante b

Alturas	a_2	b_2
Tomebamba	20.8771	2.1206
Machángara	15.4543	1.6179
Paute	18.9629	1.2962

5.6. Propuesta de modificación al modelo de pérdidas de trayectoria en función de la altura

Como se expuso en la Sección 5.5 los valores de las constantes a y b del modelo de pérdidas de trayectoria original guardan una relación lineal con respecto a la altura, por esta razón se propone modificar esta tendencia y generar un modelo de pérdidas de trayectoria en función de la altura y distancia de transmisión.

5.6.1. Modelo de pérdidas de trayectoria del Río Tomebamba

Remplazando los valores de las constantes a y b del modelo de pérdidas de trayectoria por el modelo lineal expuesto en la Tablas 5.21 y 5.22 se obtiene:

$$\begin{aligned} P_L(dB) &= a + b \times \log(d) + X_\sigma \\ &= (a_1 + b_1 \times h) + (a_2 + b_2 \times h) \times \log(d) + X_\sigma \\ &= (-5,766 - 14,1074 \times h) + (20,8771 + 2,1206 \times h) \times \log(d) + X_\sigma (\sigma = 8,1603) \end{aligned} \quad (5.1)$$

Donde :

- h = Altura de los equipos de transmisión.
- d = Distancia.

Donde la varianza de la variable estocástica corresponde a la media de las varianzas en cada altura.

5.6.2. Modelo de pérdidas de trayectoria del Río Machángara

Remplazando los valores de las constantes a y b del modelo de pérdidas de trayectoria por el modelo lineal expuesto en la Tablas 5.21 y 5.22 se obtiene:

$$\begin{aligned} P_L(dB) &= a + b \times \log(d) + X_\sigma \\ &= (a_1 + b_1 \times h) + (a_2 + b_2 \times h) \times \log(d) + X_\sigma \\ &= (16,8184 - 9,8363 \times h) + (15,4543 + 1,6179 \times h) \times \log(d) + X_\sigma (\sigma = 5,007) \end{aligned} \quad (5.2)$$

5.6.3. Modelo de pérdidas de trayectoria del Río Paute

Remplazando los valores de las constantes a y b del modelo de pérdidas de trayectoria por el modelo lineal expuesto en la Tablas 5.21 y 5.22 se obtiene:

$$\begin{aligned}
 P_L(dB) &= a + b \times \log(d) + X_\sigma \\
 &= (a_1 + b_1 \times h) + (a_2 + b_2 \times h) \times \log(d) + X_\sigma \\
 &= (-2,7859 - 6,5649 \times h) + (18,9629 + 1,2962 \times h) \times \log(d) + X_\sigma (\sigma = 5,8020)
 \end{aligned}
 \tag{5.3}$$

5.7. Comparación de los modelos propuestos con trabajos previos

Como primer paso, se realizó el análisis de los modelos propuestos, en las Figuras 5.14, 5.15 y 5.16 se puede observar el rango de operación del modelo para variaciones de altura entre 0 y 10 metros. Como se observa en la Figura 5.12, al aumentar la altura de los equipos disminuye la constante a del modelo, lo que a su vez disminuye la pérdida de espacio libre, el efecto de la variación de la altura en el modelo es especialmente notorio en los primeros metros y al alcanzar el rango máximo de la transmisión.

Por otro lado, al comparar los resultados con los modelos de pérdidas de trayectoria encontrados en [11], se puede notar una discrepancia importante en los primeros 800 metros del modelo, resultados similares fueron obtenidos cuando no se desecharon los valores no fiables establecidos en el Apéndice A.

Cabe recalcar que el modelo propuesto en este estudio está verificado para alturas de 1, 2 y 3 metros, la validación del mismo para alturas superiores se propone como un trabajo futuro.

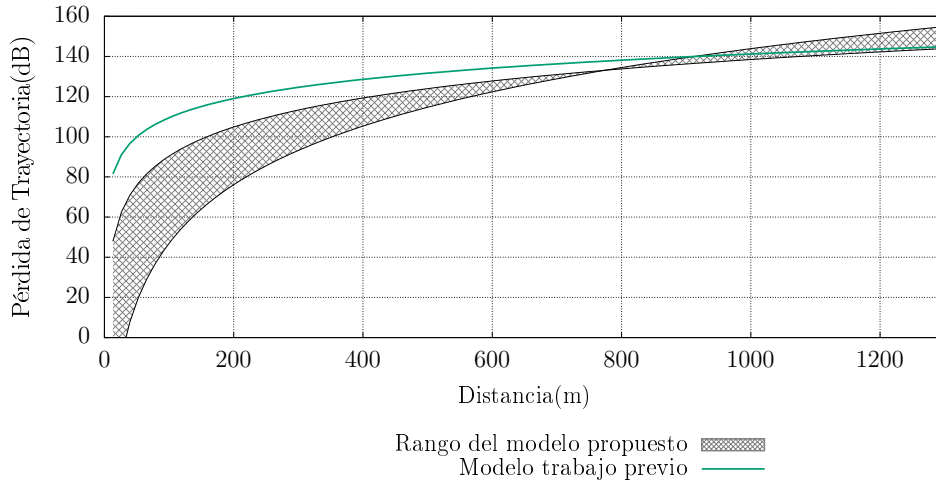


Figura 5.14: Rango de pérdidas de trayectoria del modelo propuesto del río Tomebamba

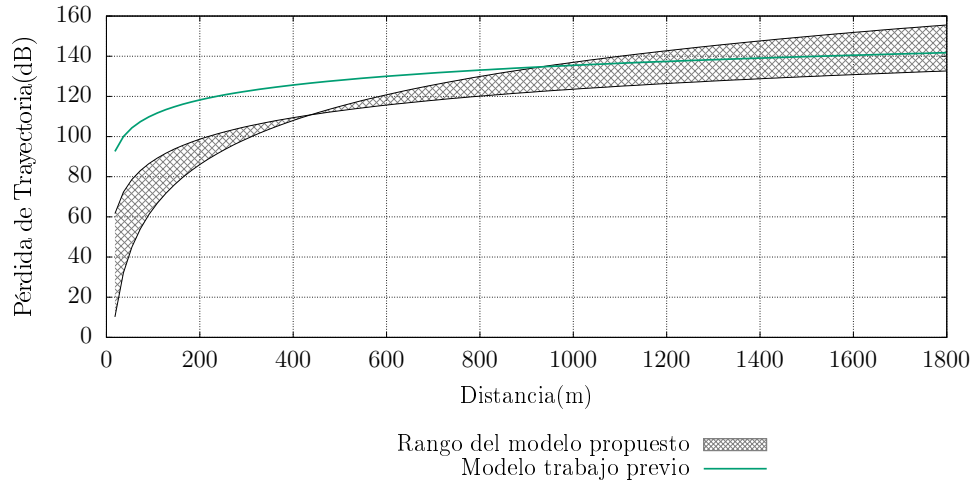


Figura 5.15: Rango de pérdidas de trayectoria del modelo propuesto del río Machángara

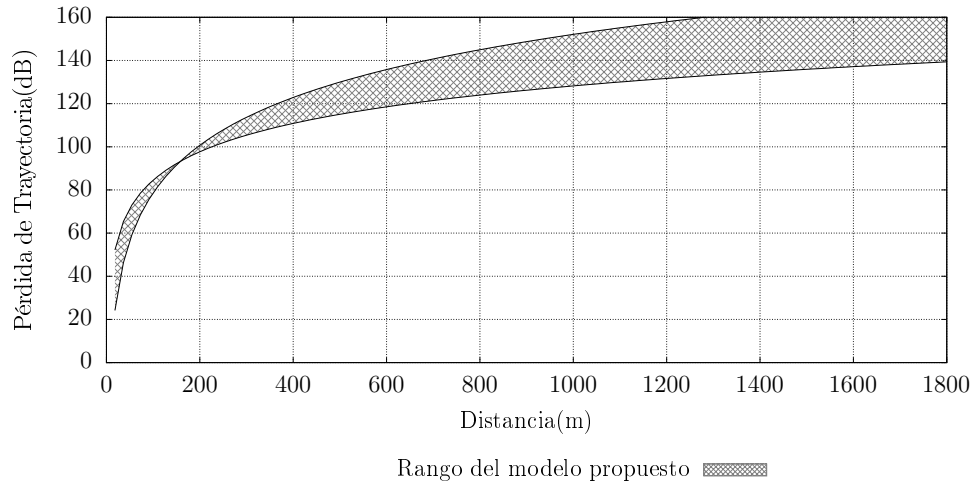


Figura 5.16: Rango de pérdidas de trayectoria del modelo propuesto del río Paute

5.8. Comparación de los modelos propuestos con LoRa-Sim

El modelo de perdidas de trayectoria utilizado en LoRaSim se basa en la Ecuación 5.4.

$$P_L(dB) = P_0 + 10 \times \gamma \times \log_{10}\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma \quad (5.4)$$

Donde:

- P_0 = Potencia recibida en la distancia de referencia dBm.
- d_0 = Distancia de referencia m.
- γ = Constante que representa el ambiente (se obtiene de manera empírica).

Se realizó simulaciones de transmisión cada 50 metros hasta una distancia máxima de 1 kilómetro para obtener valores de RSSI y así conseguir las constantes P_0 , d_0 y γ que utiliza LoRaSim por defecto, este modelo en conjunto con el modelo propuesto del río Tomebamba se expone en la Figura 5.17.

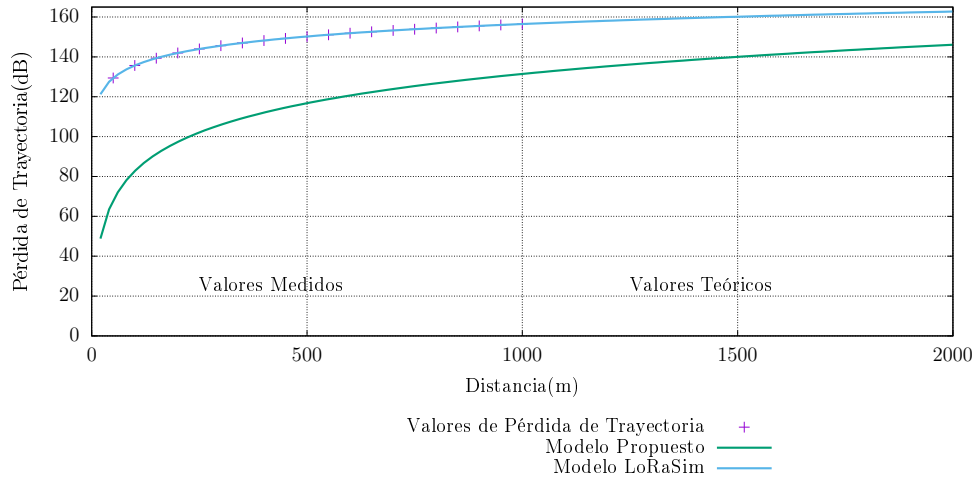


Figura 5.17: Modelo de perdidas de trayectoria por defecto LoRaSim

Como se puede notar, el modelo por defecto difiere en gran medida a los modelos propuestos en este documento, además de que no se encuentra implementada una variable estocástica. Ya que el modelo LoRaSim se basa en una ecuación logarítmica, es posible encontrar los valores de P_0 y γ para un $d_0 = 40m$ a partir de las modelos de perdidas de trayectoria propuestos para cada ambiente, estos valores se muestran en la Tabla 5.23.

Tabla 5.23: Resultados de los modelos de perdidas de trayectoria

Río	Altura	P_0	γ	σ
Tomebamba	1m	65.3072	5.3519	4.8068
	2m	57.9882	5.6707	5.204
	3m	52.7374	6.3285	14.4701
Machángara	1m	71.3568	3.6457	6.5146
	2m	63.2963	4.8741	4.4442
	3m	63.6212	4.3908	4.0624
Paute	1m	66.1141	4.6225	5.7657
	2m	62.1344	5.0479	5.9105
	3m	62.5472	5.2194	5.73

5.9. Conclusiones

Las pruebas estadísticas mostraron una correlación entre las variaciones de SF y tamaño de carga útil lo cual se puede observar gráficamente en el Apéndice B, en cuanto a la variación de altura, los *test* de Dunn para los ambientes suburbano y rural mostraron correlación mientras que en el ambiente urbano la altura de 1m mostró una diferencia con las demás alturas.

Los valores de RSSI usados para el ajuste del modelo logarítmico fueron menores a -100 dBm tal como se expone en el Apéndice A, si bien las muestras utilizadas para el ajuste tienen una distancia máxima de entre 500 y 700 metros, el modelo resultante mostró una distancia de transmisión máxima similar a la obtenida en el campo.

Los valores P del *test* de Dunn concluyen una correlación estadística entre los ambientes suburbano y rural denotando la diferencia de los mismos con el ambiente urbano, esto contradice a los resultados obtenidos en [11] esto podría obedecer a que en dicho estudio no se desearon los valores no concluyentes.

Observando los valores de la constantes a y b del modelo de pérdidas por trayectoria se observó una tendencia lineal con respecto a la variación de la altura por lo que se propuso una modificación al modelo original. Comparando este modelo con los obtenidos en [11], se aprecia diferencias significativas especialmente en los primeros 800 metros, esto se debe a que en [11] no se descartaron los valores no confiables de RSSI establecidos en el Apéndice A, en cuanto al rango de transmisión, se obtuvieron alcances máximos similares en ambos estudios.





Capítulo 6

Conclusiones y Recomendaciones

En este capítulo se presentan las conclusiones finales del trabajo realizado, limitaciones y recomendaciones encontradas al momento de la adquisición de datos y propuestas de ampliación de este trabajo para el futuro.

6.1. Conclusiones

En este estudio se ha demostrado que el alcance máximo y comportamiento de [RSSI](#), [SNR](#) y [PER](#) son influenciados por la topografía, vegetación y obstáculos presentes en el ambiente en donde se desarrolla la red [LoRa](#).

Si bien la hipótesis inicial pretendía modificar el modelo de pérdidas de trayectoria para tomar en cuenta parámetros de la configuración y operación tales como el [SF](#) y tamaño de carga útil se demostró que estas variables no afectan al desempeño de la capa física [LoRa](#) ya que mostraron valores de [RSSI](#) y [SNR](#) similares.

En cuanto a la variación de altura, los resultados de la comparación estadística mostraron una diferencia significativa en la variación de este parámetro únicamente en el ambiente urbano, sin embargo, al momento del ajuste de datos se observó una tendencia lineal de las constantes del modelo de pérdidas de trayectoria propuesto originalmente con respecto a la altura utilizada, no se consideró necesaria la variación de potencia de transmisión en las campañas de mediciones ya que en el Apéndice [A](#) se demostró el efecto del mismo en los valores de [RSSI](#).

Al comparar los resultados con los obtenidos en [\[11\]](#) se observaron diferencias en los valores de los modelos de pérdidas de trayectoria y contradicciones en el análisis estadístico entre ambientes, esto se debe a que en el presente trabajo se desecharon los valores de [RSSI](#) menores a -110 dBm los cuales no son confiables como se demostró en el Apéndice [A](#).

6.2. Recomendaciones

En el transcurso del trabajo se notaron varias características que pueden mejorar la señal recibida y por ende aumentar la calidad de futuras implementaciones de la red [LoRa](#) las cuales se presentan a continuación:

- Se observaron variaciones de [RSSI](#) de hasta 30 dBm al colocar los equipos junto a la copa de los árboles, esto era más notorio al existir movimiento de los mismos por acción del viento por esta razón se recomienda la instalación de los equipos en lugares despejados que se encuentren por lo menos a dos metros de la vegetación.
- Para futuros análisis de ambientes con el uso de los equipos mencionados en el Capítulo [4](#) es importante enfocarse en los primeros 500 a 800 metros de la transmisión, se observó que los valores de [RSSI](#) obtenidos a distancias mayores no son confiables ni concluyentes.
- Para implementaciones de redes [LoRa](#) en estos ambientes se sugiere no exceder distancias de transmisión de 500 metros en ambientes urbanos y 1200 metros para ambientes suburbanos y rurales, esto asegura un valor de [PER](#) menor al 10%.

6.3. Trabajos Futuros

En la elaboración de este trabajo surgieron dudas y limitaciones que podrían ser contempladas para futuros trabajos las cuales se detallan a continuación:

- Como se comprobó en el Apéndice [A](#), ni la antena omnidireccional incluida en el kit ni la antena direccional HG908p-SM presentan una frecuencia de resonancia ni un ancho de banda acorde a la frecuencia de operación del kit [LoRa](#) 900 por lo que sería interesante el diseño y construcción de antenas especiales para este propósito.
- Si bien este estudio se centró en la utilización de la capa [MAC LoRaWAN](#) teóricamente sus resultados pueden ser usados para el diseño e implementación de redes [LoRa](#) basadas en otras capas [MAC](#) como [LoRa](#), por lo que sería adecuado un estudio que valide lo antes mencionado.
- En este trabajo se evaluó el desempeño de los equipos posicionando el transmisor y receptor en el margen del río, sería conveniente realizar un estudio que utilice una arquitectura [LoRaWAN](#) ubicando el *gateway* en torres de transmisión o edificios circundantes con el propósito de abarcar más aplicaciones [IoT](#).



Anexos



Apéndice A

Reporte Técnico

El siguiente reporte técnico tuvo como objetivo la verificación y caracterización de los valores de [RSSI](#) y [SNR](#) entregados por los equipos de transmisión del kit de desarrollo LoRa 900 el cual será utilizado en la evaluación del comportamiento de la tecnología [LoRa](#) en varios ambientes.



PRUEBAS DE LABORATORIO DEL KIT DE DESARROLLO LORA 900

Juan Peralta(JP), Liseth Carrion(LC), Carlos Alvarez(CA)

10 de septiembre de 2017

Universidad de Cuenca

Departamento de Ingeniería
Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (DEET)

Reporte Técnico Núm. DEET-PWSN-2017-09

Índice

1. Introducción	1
2. Materiales y Equipos	1
2.1. Atenuador de paso manual	1
2.2. Dispositivo PXI	4
2.3. Sensor de potencia USB-5681	4
3. Caracterización de equipos	5
3.1. Atenuación de conductores	5
3.2. Verificación de potencia de transmisión del módulo LoRa	7
3.3. Verificación de modo de transmisión del módulo LoRa	7
3.4. Análisis de cantidad de paquetes perdidos	7
3.5. Verificación de parámetros de antenas	7
4. Metodología	10
4.1. Pruebas en Laboratorio	10
4.2. Pruebas en Campo	11
5. Resultados	13
5.1. Pruebas de Laboratorio	13
5.2. Pruebas de Campo	14
6. Conclusiones y Recomendaciones	22
A. Anexo I: Implementación del Servidor LoRa	24
A.1. Instalación de librería para el descifrado	24
A.2. Código para el descifrado	24
A.3. Código del Servidor	25
B. Anexo II: Código del Transmisor	27

Índice de figuras

1.	Atenuación del cable de 0.5m	5
2.	Atenuación del cable de 0.75m	6
3.	Atenuación del cable de 1m	6
4.	Espectro de transmisión del modulo LoRa	8
5.	Paquetes perdidos según el número de paquetes transmitidos.	8
6.	Impedancia antena omnidireccional	9
7.	Impedancia antena direccional	9
8.	Disposición de los dispositivos LoRa para las pruebas de laboratorio .	10
9.	Ambiente de prueba 1, distancia 115.12 metros	12
10.	Ambiente de prueba 2, distancia 1.797,77 metros	12
11.	Prueba de Laboratorio: RSSI vs Atenuación	13
12.	Prueba de Laboratorio: Paquetes Recibidos vs Atenuación	14
13.	Prueba de Laboratorio: SNR vs Atenuación	14
14.	Ambiente 1: RSSI vs Campo Esperado	15
15.	Ambiente 1: SNR vs Campo Esperado	16
16.	Ambiente 1: PER vs Campo Esperado	16
17.	Ambiente 1: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio	17
18.	Ambiente 2 antena omnidireccional: RSSI vs Campo Esperado	18
19.	Ambiente 2 antena omnidireccional: SNR vs Campo Esperado	18
20.	Ambiente 2 antena omnidireccional: PER vs Campo Esperado	19
21.	Ambiente 2 antena omnidireccional: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio	19
22.	Ambiente 2 antena direccional: RSSI vs Campo Esperado	20
23.	Ambiente 2 antena direccional: SNR vs Campo Esperado	20
24.	Ambiente 2 antena direccional: PER vs Campo Esperado	21
25.	Ambiente 2 antena direccional: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio	21

Índice de tablas

1.	Descripción de atenuador variable.	3
2.	Precisión en función de la atenuación.	3
3.	Descripción de medidor de potencia USB-5681.	4
4.	Potencia de transmisión del módulo LoRa	7

1. Introducción

El trabajo expuesto en este documento, fue realizado con el fin de verificar la fiabilidad de los valores de RSSI y SNR entregados por los equipos de transmisión del kit de desarrollo LoRa 900, el cual se compone de un *gateway* y dos nodos que cuentan con el módulo RN2903 producido por Semtech¹. Este trabajo forma parte del proyecto *Aplicación de tecnologías inalámbricas al sistema de predicción de caudales en la cuenca del río Tomebamba*.

Durante el desarrollo del trabajo, se comprobó varios parámetros técnicos de los equipos a utilizar tales como: atenuación de conductores, potencia y modo de transmisión del módulo LoRa. También se verificó los parámetros de las antenas direccional y omnidireccional.

Se realizó campañas de mediciones dentro de laboratorio y en ambientes exteriores controlados, utilizando atenuadores de potencia fijos y variables para determinar el comportamiento del indicador de nivel de señal recibida medida por el equipo (RSSI) por sus siglas en inglés. Los valores de RSSI obtenidos tanto en las pruebas de laboratorio y en ambientes controlados mostraron una correlación con el nivel de potencia esperado hasta un valor mínimo de -110dBm, los valores de atenuación menores a este no revelaron relación con la medida de RSSI del equipo. Mientras que, la cantidad de paquetes perdidos en cada transmisión se mantuvo constante alrededor del 5 % hasta un valor mínimo el cual variaba dependiendo del factor de ensanchamiento utilizado.

Las transmisiones se realizaron con diferentes valores de carga útil y factor de ensanchamiento, pero los resultados no revelaron una diferencia considerable de estos factores en la medida de RSSI y SNR. Sin embargo, la tasa de pérdida de paquetes si se vio afectada, por lo que es importante aumentar la cantidad de paquetes enviados en valores de nivel de potencia menores a -110dBm.

2. Materiales y Equipos

2.1. Atenuador de paso manual

Los atenuadores de Radio Frecuencia (RF) son dispositivos que se utilizan para reducir la potencia de una señal sin distorsionar su forma original; es decir, son resistencias eléctricas que se alinean con una señal de RF y reducen la intensidad de la señal al convertir cierta cantidad de energía de RF en calor. El nivel de atenuación está definido por el valor de resistencia utilizada. Las señales de RF son irradiadas entre equipo transmisor y receptor; cuando dos conexiones de este sistema se encuentran ubicados demasiado cerca, entonces pueden actuar como un corto dependiendo de la frecuencia

¹Semtech - <https://www.semtech.com/>

de la señal de RF, las resistencias de hilo bobinado no tienen un comportamiento de atenuador sino que actúan como inductores.

2.1.1. Atenuadores Fijos

Estos dispositivos normalmente están integrados por resistencias de carbono, cuyo valor está determinado por el nivel de atenuación necesario. Si la aplicación requiere tener una atenuación muy precisa, entonces es necesario una resistencia de precisión y atenuadores calibrados, estos requerimientos se traducen en un mayor costo del atenuador.

2.1.2. Atenuadores conmutados

Los atenuadores conmutados comprenden dos partes: conmutadores de RF y resistencias fijas. Estos dispositivos permiten obtener varios niveles de atenuación, esto se consigue conmutando entre diferentes resistencias. Según el nivel de precisión y la frecuencia requerida son necesarios diferentes tipos de conmutador, teniendo desde elementos mecánicos hasta digitales, pero también se pueden usar relés de RF y otros métodos de conmutación.

2.1.3. Atenuadores variables

Los atenuadores variables pueden ser digitales o analógicos, cuya principal característica es permitir el ajuste del nivel de atenuación en función de una resistencia variable. Dispositivos de mayor precisión están conformados por elementos integrados que permiten ajustarse a diferentes valores de frecuencia y potencia.

2.1.4. Aplicaciones

Las aplicaciones más comunes de los atenuadores de RF son en procedimientos de pruebas y mediciones, en donde el nivel de la señal necesita ser controlado; ya que puede estar por encima de lo recomendado para el buen funcionamiento del equipo de prueba.

Un atenuador se puede utilizar para proporcionar una adaptación de impedancia precisa, ya que la mayoría de atenuadores fijos ofrecen una impedancia bien definida.

2.1.5. Atenuadores de RF de paso manual 8494B y 8496B

La atenuación puede ser variada mediante una perilla de control ubicada en la parte lateral del equipo, esta atenuación es añadida en la ruta de la señal sobre la pérdida de inserción del atenuador en la posición de 0dB. Estos atenuadores de paso

coaxiales son de 50 ohmios. La atenuación total que proporciona el dispositivo está determinada por la atenuación que se configure de manera individual en cada elemento 8494B y 8496B, los cuales están conectados en cascada. Los conectores de ambas secciones son de Tipo N hembra.

Dispositivo	8494B	8496B
Rango de Frecuencia	dc a 18 GHz	dc a 18 GHz
Atenuacion	0 dB a 11 dB	0 dB a 110 dB
Paso	1 dB	10 dB

Tabla 1: Descripción de atenuador variable.

En la Tabla 2 se muestra la precisión que presenta el equipo ante diferentes valores de atenuación requerido.

8494B	8496B	8494B	8496B
Atenuación dB	Atenuación dB	dc a 18 GHz	dc a 18 GHz
1	10	0.3	0.5
2	20	0.3	0.7
3	30	0.4	0.9
4	40	0.4	1.2
5	50	0.5	1.5
6	60	0.5	1.8
7	70	0.6	2.1
8	80	0.6	2.4
9	90	0.6	2.7
10	100	0.6	3.0
11	110	0.7	3.3

Tabla 2: Precisión en función de la atenuación.

2.1.6. Recomendación

No es aconsejable utilizar el equipo para medir señales que excedan 1W de potencia. Además, no se debe aplicar una tensión mayor a 7 Vcd en la entrada o salida del atenuador.

2.2. Dispositivo PXI

PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) es una plataforma de instrumentación modular, diseñada para aplicaciones de alto rendimiento y bajo costo de implementación; con características mecánicas, eléctricas y de software que definen sistemas completos para aplicaciones de pruebas militares, aeroespaciales, monitoreo de máquinas, automotrices y pruebas industriales. Proporciona energía, enfriamiento y un bus de comunicación para soportar múltiples módulos de instrumentación dentro de un mismo chasis. National Instruments desarrolló y anunció la especificación PXI en 1997 y la publicó en 1998, PXI es un estándar abierto en la industria gobernado por PXI Systems Alliance (PXISA).

2.3. Sensor de potencia USB-5681

El dispositivo utilizado para medir la potencia de la señal de RF radiada por el transmisor es un USB-5681 de National Instruments, el cual permite determinar el valor de potencia RMS; este elemento cuenta con conectividad USB que permite alimentarlo desde el computador. El dispositivo consume 150 mA de la conexión USB, lo que lo convierte en ideal para aplicaciones móviles, resulta muy conveniente cuando se requiere obtener medidas promedio con un gran nivel de precisión.

La activación del hardware del USB-5681, puede ser por una fuente de activación externa o por su propio software, la elección se da en función de la fuente de señal. Para visualizar el valor medido se hace uso del propio software NI-568x Soft Front Panel en el cual se muestra de manera numérica y gráfica.

Parámetros generales	
Tipo de equipo	Medidor de potencia portátil
Medición de Potencia	Potencia media
Canales	Canal único
Frecuencia	10 MHz a 18 GHz
Rango de potencia	-40 a 20 dBm
Impedancia	100 k Ω
Resolución de medición	0.01 dB
Rango de retardo	-5 ms a 10 s

Tabla 3: Descripción de medidor de potencia USB-5681.

3. Caracterización de equipos

3.1. Atenuación de conductores

El proceso de caracterización de los atenuadores se realizó en el equipo PXI expuesto en la Sección 2.2.

El valor de atenuación de los conductores fue determinado mediante una transmisión con -10dBm de potencia, la diferencia de potencia medida por el modulo receptor se considera como la atenuación producida por los conductores.

Las gráficas de potencia obtenidas para diferentes longitudes de cable se muestran en las Figuras 1, 2 y 3.

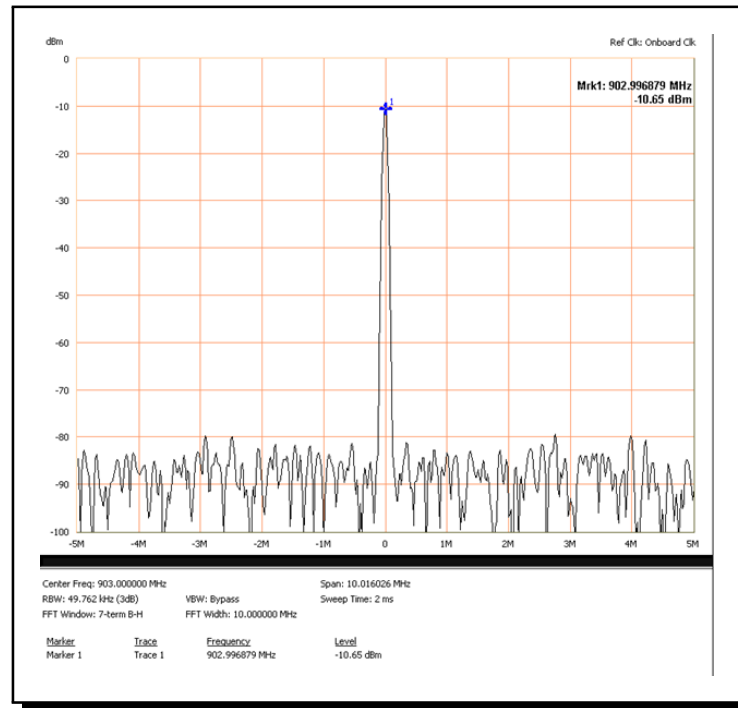


Figura 1: Atenuación del cable de 0.5m

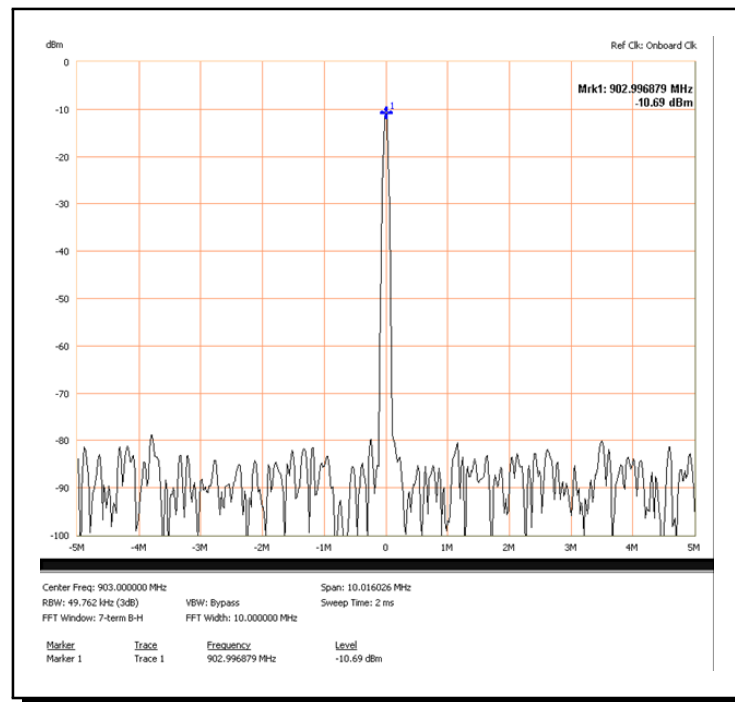


Figura 2: Atenuación del cable de 0.75m

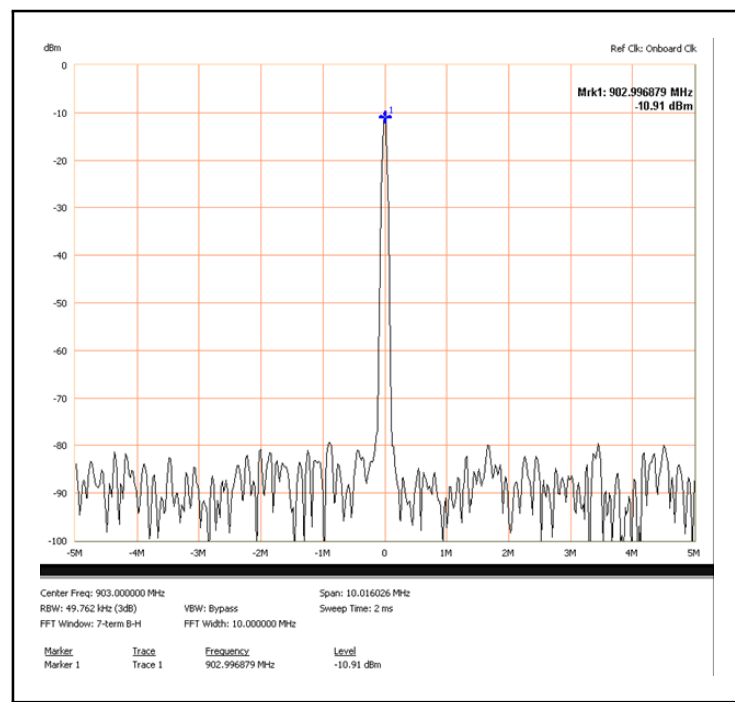


Figura 3: Atenuación del cable de 1m

3.2. Verificación de potencia de transmisión del módulo LoRa

Las pruebas para determinar la potencia de transmisión del módulo LoRa fueron realizadas con las diferentes configuraciones de potencia (pwridx) expuestas en [1].

El dispositivo de medición de potencia utilizado fue el mostrado en la Sección 2.3, los resultados de las pruebas y su comparación con lo especificado por el fabricante se muestra en la Tabla 4.

Configuración (pwridx)	Potencia Medida (db)	Potencia Fabricante (db)
5	18.43	18.5
7	15.74	15
8	13.91	14
9	12.05	13
10	10.14	10

Tabla 4: Potencia de transmisión del módulo LoRa

3.3. Verificación de modo de transmisión del módulo LoRa

Se utilizó el equipo PXI expuesto en la Sección 2.2 en modo de captura de máximos para obtener el espectro completo de la transmisión, al ser el dispositivo utilizado de Clase A[2], la transmisión se realiza de manera no continua, un paquete a la vez. Como se puede observar en la Figura 4, se utilizan 7 portadoras que se encuentran alrededor de los 903Mhz.

3.4. Análisis de cantidad de paquetes perdidos

Para las pruebas de laboratorio y de campo se debe enviar cierta cantidad de paquetes, la finalidad de esta prueba es verificar la fiabilidad del valor de pérdida de paquetes con respecto a la cantidad de paquetes transmitidos. En la Figura 5 se puede observar varias transmisiones con diferente número de paquetes en el cual se ha variado el nivel de atenuación, los resultados obtenidos muestran que en las transmisiones entre 300 y 1000 paquetes la cantidad de paquetes perdidos es un valor estable.

3.5. Verificación de parámetros de antenas

Se realizó una prueba de impedancia a cada antena que se usarán en el campo para la verificación de la frecuencia de resonancia de las mismas.

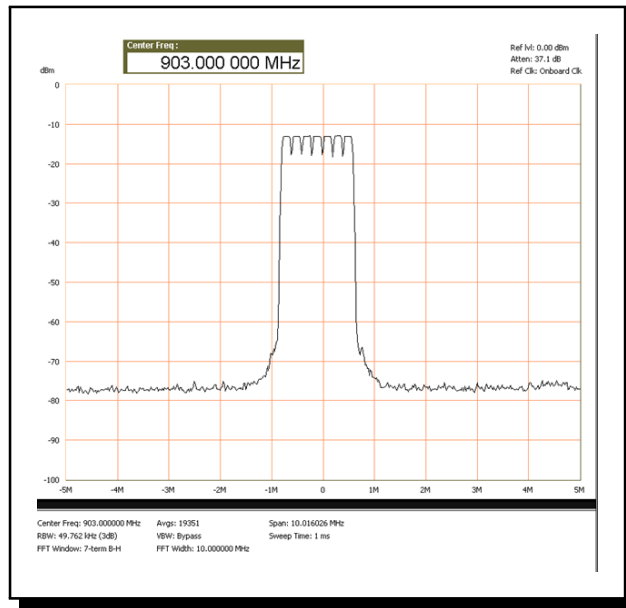


Figura 4: Espectro de transmisión del módulo LoRa

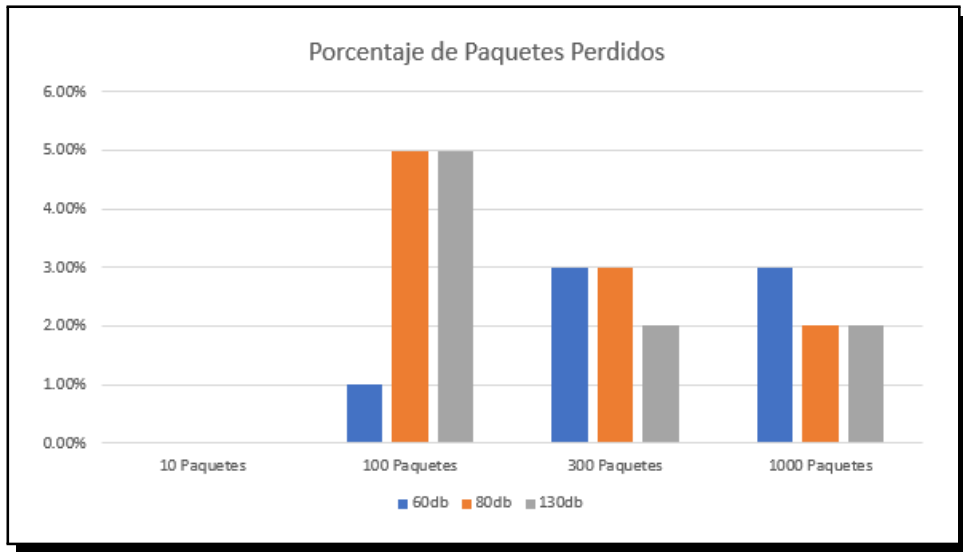


Figura 5: Paquetes perdidos según el número de paquetes transmitidos.

El gráfico obtenido para la antena omnidireccional incluida en el kit de desarrollo LoRa 900 se muestra en la Figura 6.

De manera similar, se realizó la prueba hacia una antena direccional HG908p-SM de la empresa L-COM, los resultados obtenidos se muestran en la Figura 7.

La sección del espectro utilizada por el módulo LoRa 900 se encuentran delimitadas por las barras rojas verticales. Se observó que ninguna de las antenas analizadas fueron

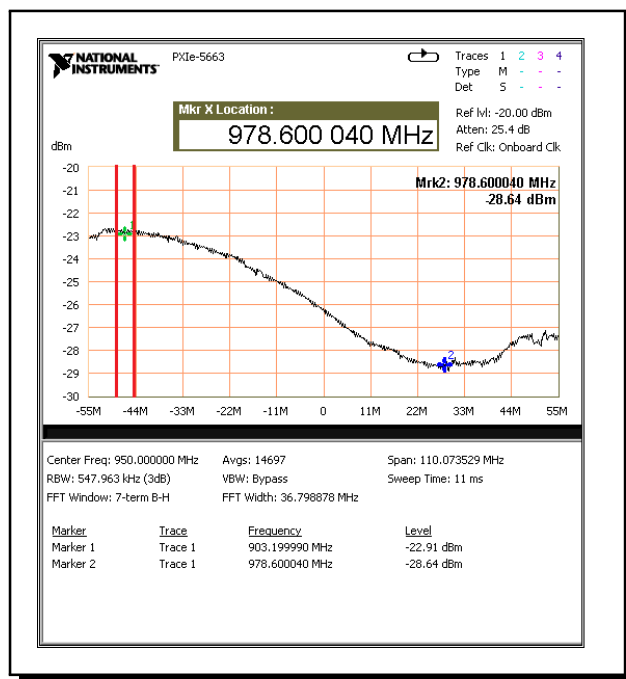


Figura 6: Impedancia antenna omnidireccional

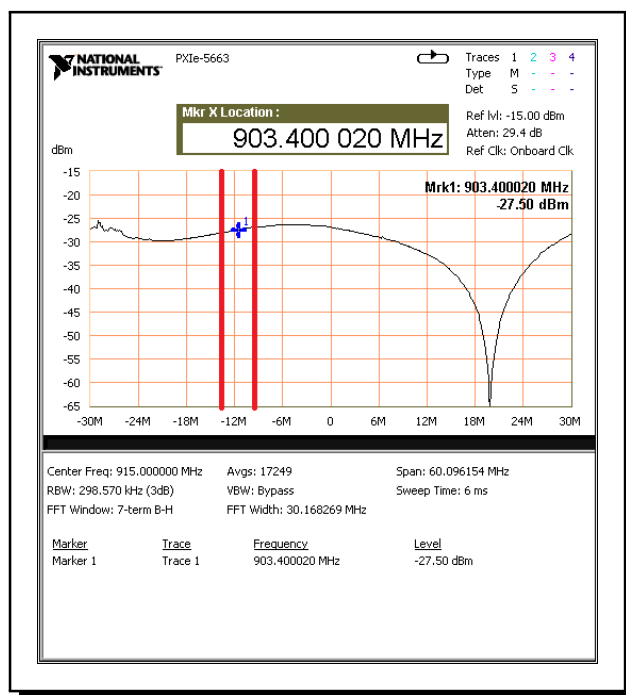


Figura 7: Impedancia antenna direccional

construidas con una frecuencia de resonancia acorde a la frecuencia de transmisión

utilizada. Al no tener una antena de referencia, no se pudo validar la ganancia de las mismas.

4. Metodología

4.1. Pruebas en Laboratorio

Se realizaron pruebas de transmisión en un ambiente controlado con el objetivo de verificar la relación existente entre la medición de RSSI entregada por el equipo LoRa 900 y la atenuación introducida.

Estos resultados serán útiles para comprobar si este valor puede ser utilizado para la construcción de un modelo de propagación para varios ambientes.

4.1.1. Diagrama de bloques de la prueba

La disposición de los equipos utilizados se muestra en la Figura 8, los módulos se encuentran acoplados a través de cables de transmisión de RF caracterizados en la Sección 3.1, en el centro se colocó un atenuador variable para simular las pérdidas de espacio libre existente entre los equipos de transmisión.

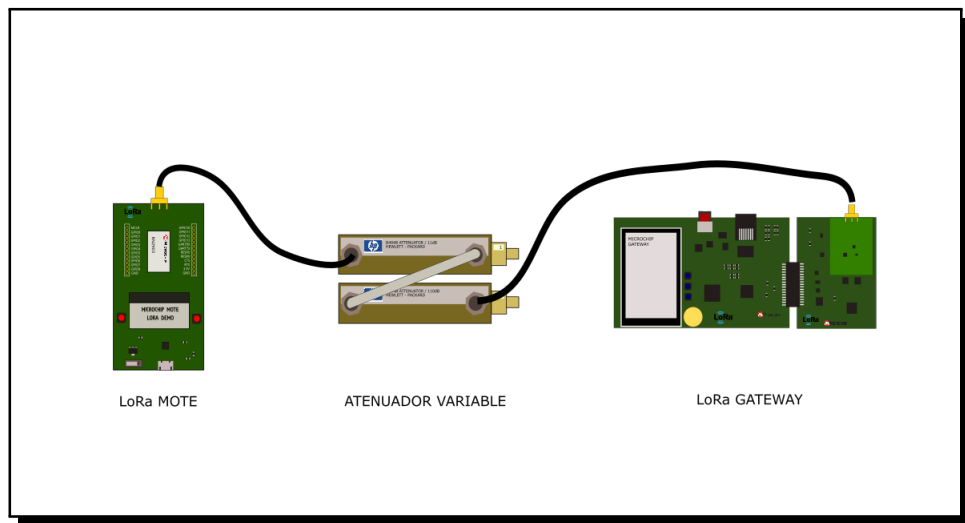


Figura 8: Disposición de los dispositivos LoRa para las pruebas de laboratorio

4.1.2. Configuraciones de los equipos

La configuración utilizada para la transmisión controlada en laboratorio fue:

- Dirección del dispositivo de red : 001AD314
- Clave de Aplicación : 3C8F262739BFE3B7BC0826991AD0504D
- Clave de Red : 2B7E151628AED2A6ABF7158809CF4F3C
- Potencia de transmisión : 18.5 dBm (pwridx 5)
- Data Rate : 980 bit/sec (DR 0) y 5470 bit/sec (DR 7)

4.1.3. Procedimiento de adquisición de datos

La prueba de transmisión consiste en el envío de 300 paquetes, cada paquete recibido entrega un valor de RSSI y SNR, dicha información es almacenada en el servidor para su posterior análisis.

Las iteraciones se iniciaron con una atenuación entre los equipos de 50dB, el cual fue el valor obtenido en pruebas de transmisión por aire con una separación de 1 metro. Para obtener una resolución aceptable se realizaron pruebas hasta los 170dB de atenuación con un paso entre cada iteración de 5dB.

4.2. Pruebas en Campo

Se realizaron pruebas de transmisión en dos tipos de ambientes, el primero ubicado dentro de la Universidad de Cuenca como se observa en la Figura 9, sin línea de vista entre el transmisor y el receptor de LoRaWAN. El segundo ubicado entre el Colegio de Ingenieros Civiles del Azuay (CICA) y el mirador de Turi como indica la Figura 10, sin obstáculos entre los equipos de transmisión.

El procedimiento de configuración y adquisición de equipos utilizado es similar a lo expuesto en las Secciones 4.1.2 y 4.1.3, tomando como atenuación inicial las pérdidas por espacio libre debido a la distancia entre los equipos de transmisión.

Adicionalmente se realizaron pruebas de transmisión con variaciones de tamaño de trama y factor de ensanchamiento.

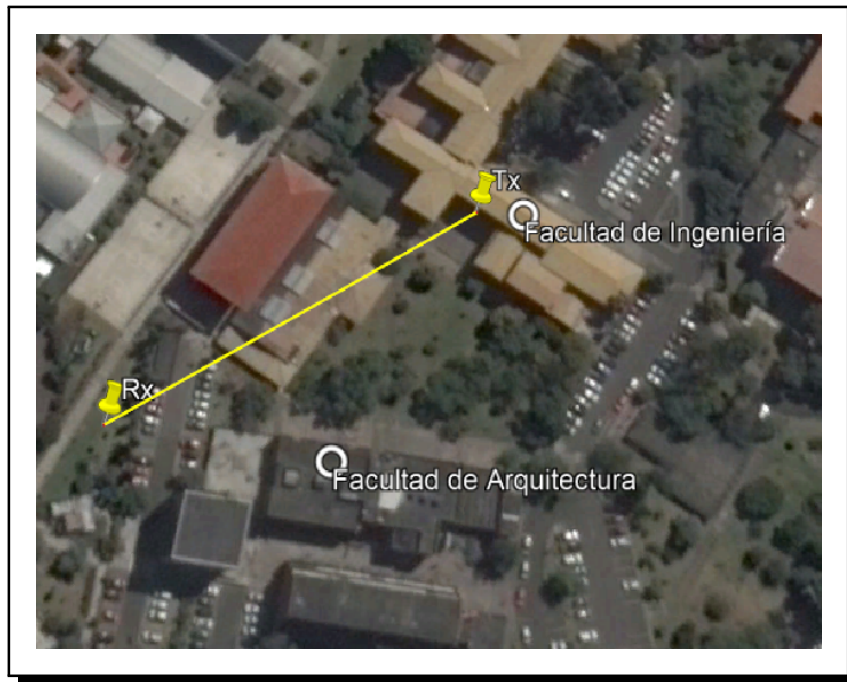


Figura 9: Ambiente de prueba 1, distancia 115.12 metros

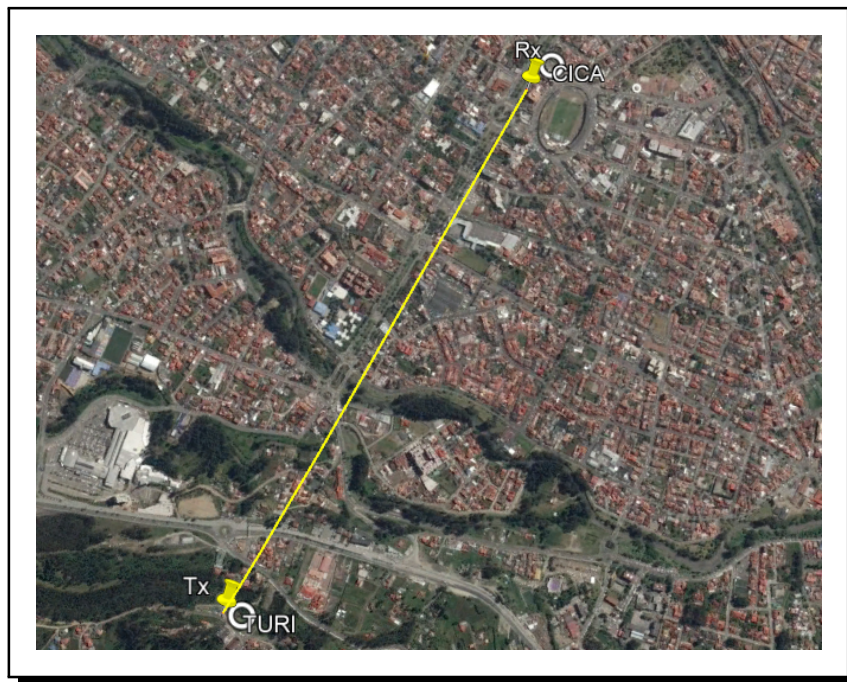


Figura 10: Ambiente de prueba 2, distancia 1.797,77 metros

5. Resultados

5.1. Pruebas de Laboratorio

Luego del análisis de los datos, se pudo observar que el RSSI se comporta de manera lineal con respecto a la atenuación introducida como se observa en la Figura 11, sin embargo se observó que para valores de RSSI menores a -110dBm los valores entregados por el equipo no son confiables ya que la medida no corresponde a la atenuación introducida.

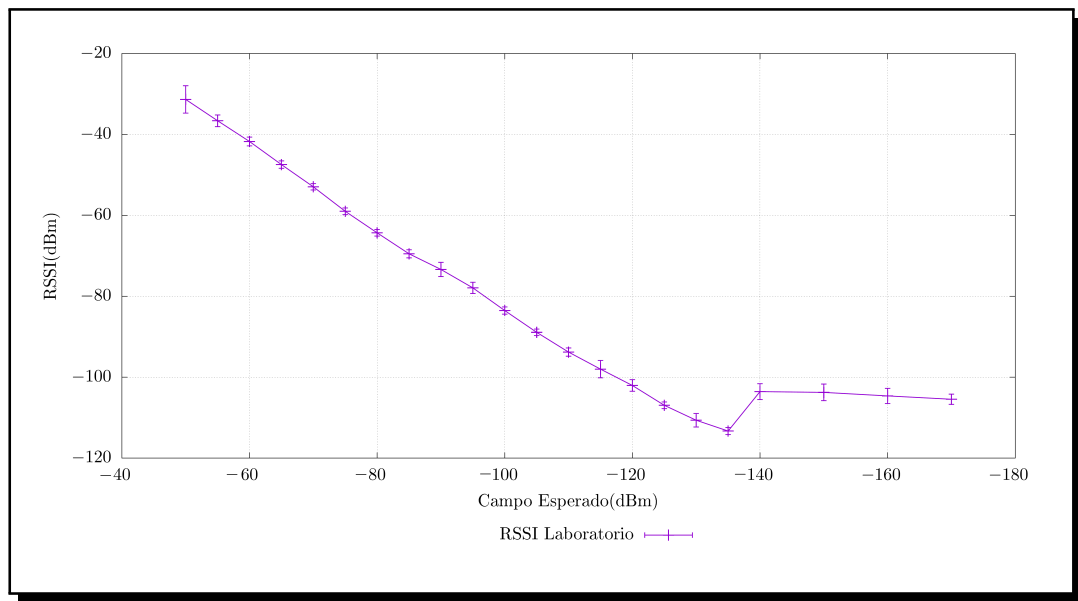


Figura 11: Prueba de Laboratorio: RSSI vs Atenuación

Por otro lado, el porcentaje de paquetes perdidos se mantuvo estable con valores entre el 2 % y 6 % como se muestra en la Figura 12. La relación señal a ruido se mantuvo con una variación mínima hasta un nivel de potencia de -110dBm donde el valor empieza a decaer, tal como se muestra en la Figura 13.

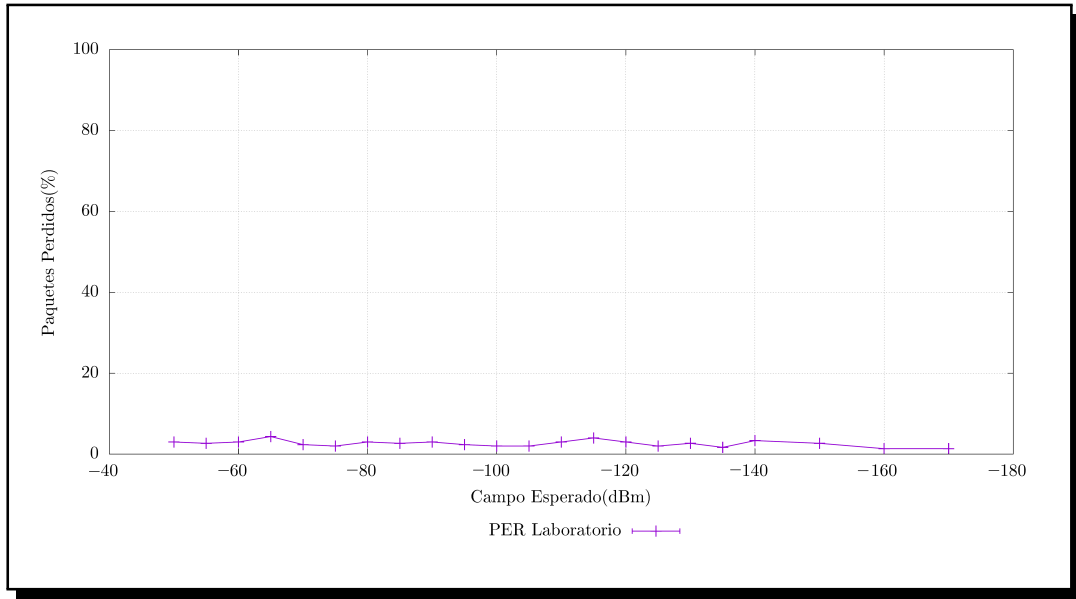


Figura 12: Prueba de Laboratorio: Paquetes Recibidos vs Atenuación

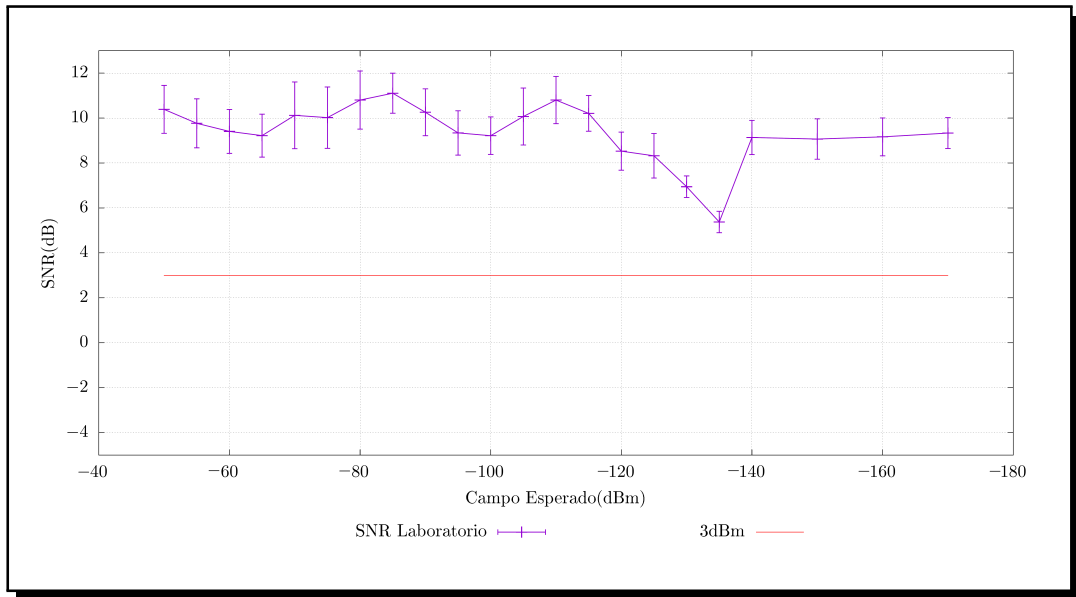


Figura 13: Prueba de Laboratorio: SNR vs Atenuación

5.2. Pruebas de Campo

5.2.1. Ambiente 1: Universidad de Cuenca

Las pruebas realizadas dentro de la Universidad de Cuenca mostraron que los valores de RSSI no cuentan con el comportamiento lineal obtenido en las pruebas de

laboratorio, esto se puede evidenciar en las Figuras 14 y 17.

Por otro lado se pudo observar dos tendencias en los valores de paquetes perdidos que corresponden al *spreading factor* utilizado, como se observa en la Figura 16.

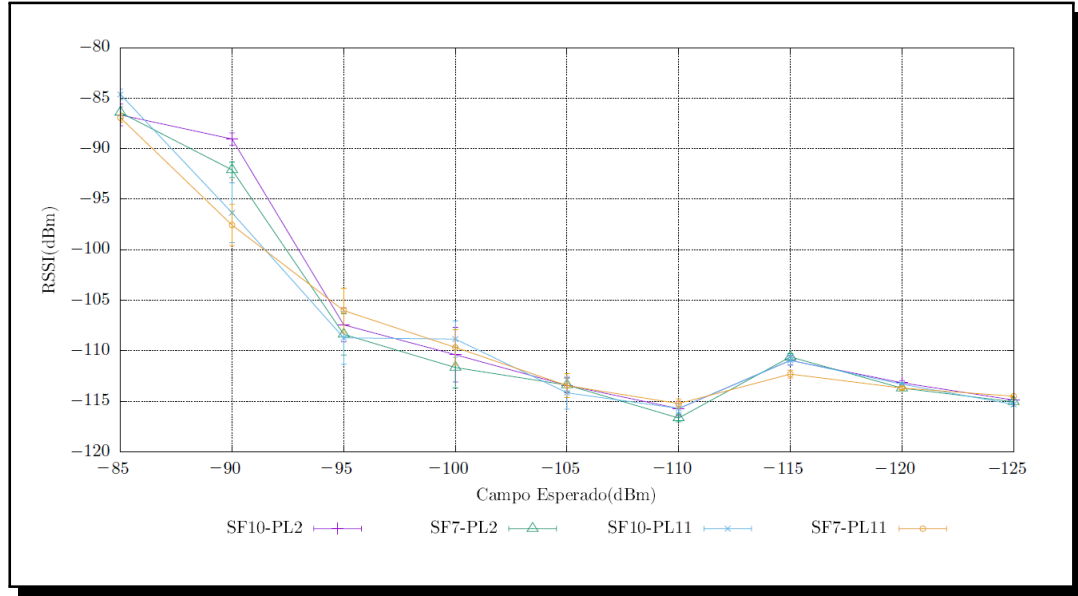


Figura 14: Ambiente 1: RSSI vs Campo Esperado

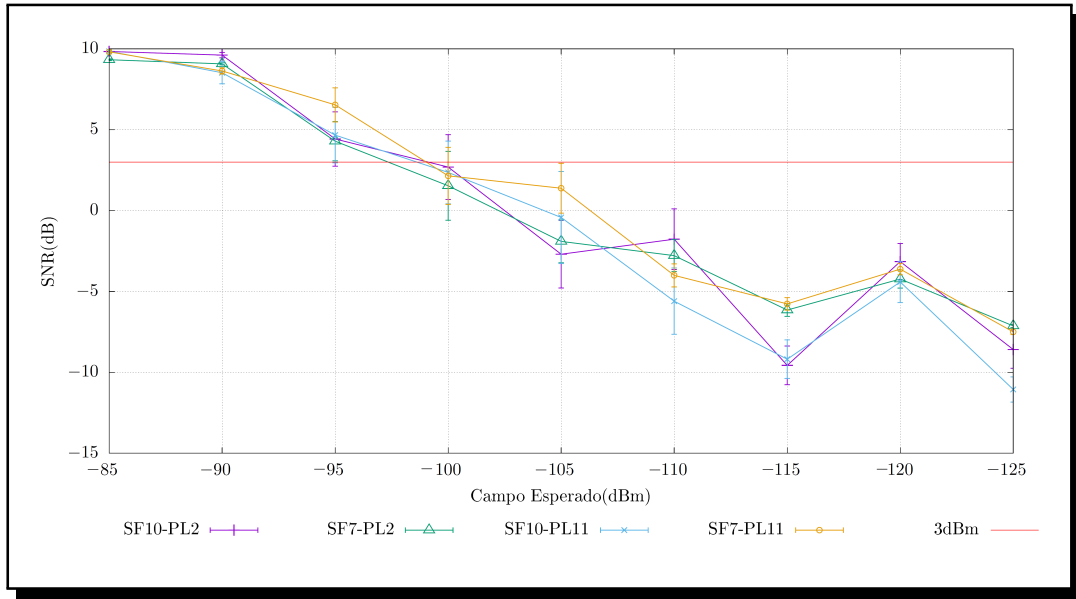


Figura 15: Ambiente 1: SNR vs Campo Esperado

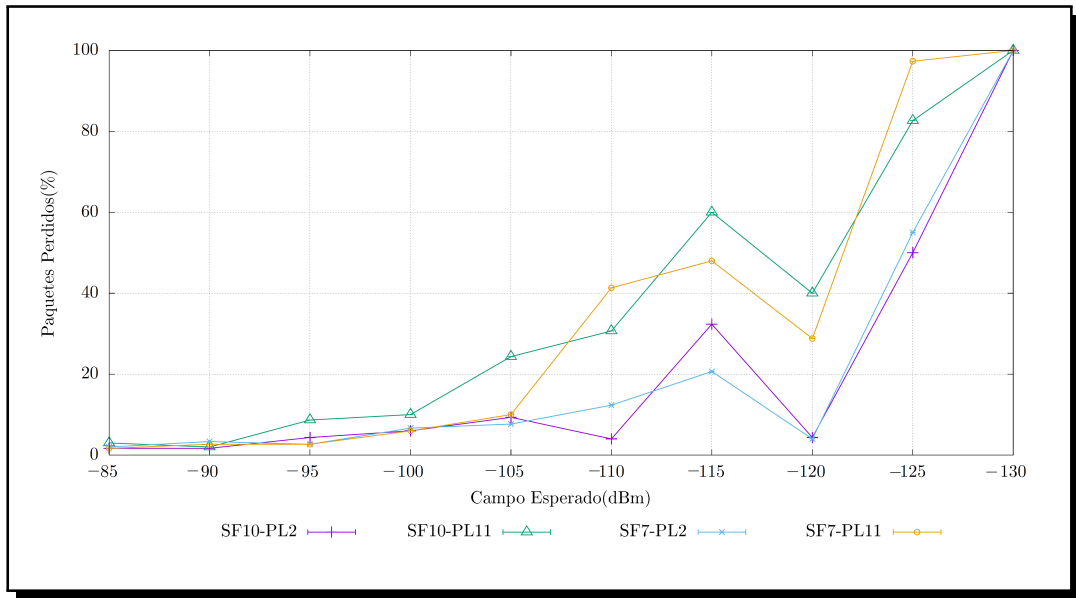


Figura 16: Ambiente 1: PER vs Campo Esperado

5.2.2. Ambiente 2: Transmisión con línea de vista

Los resultados de RSSI medidos en este ambiente con los dos tipos de antena expuestas en la Sección 3.5 corresponden a los valores de campo esperados y a los resultados obtenidos en el laboratorio. Los resultados obtenidos se presentan en las

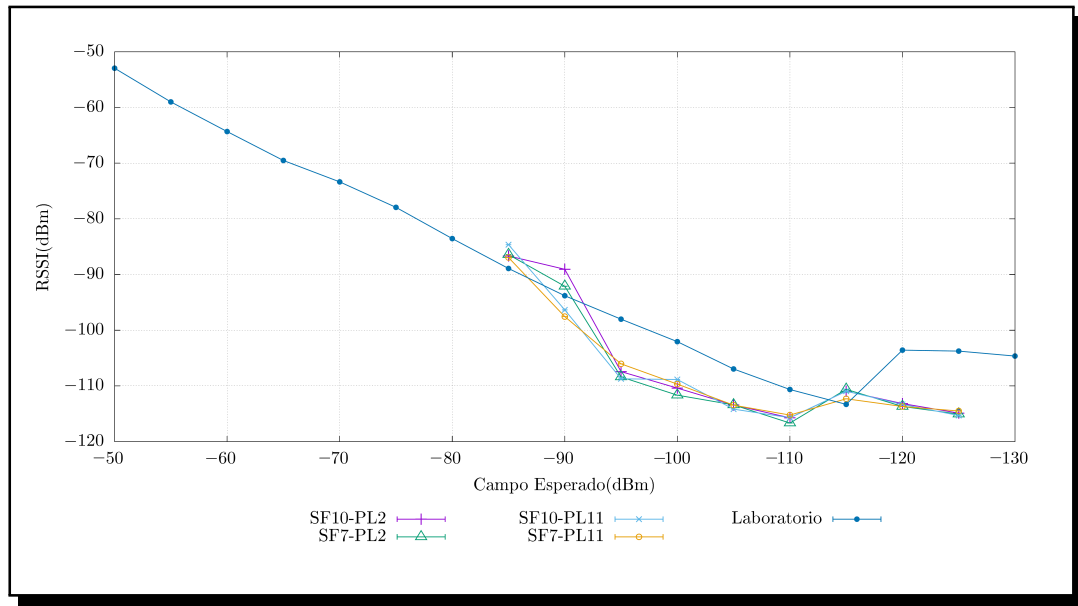


Figura 17: Ambiente 1: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio

Figuras 18,21,22 y 25.

De la misma forma que el ambiente 1, los valores de paquetes perdidos tienen relación con el factor de ensanchamiento utilizado, esto se puede evidenciar en la Figuras 20 y 24, donde el porcentaje de paquetes perdidos es menor al 10 % en valores de RSSI mayores a -110dBm.

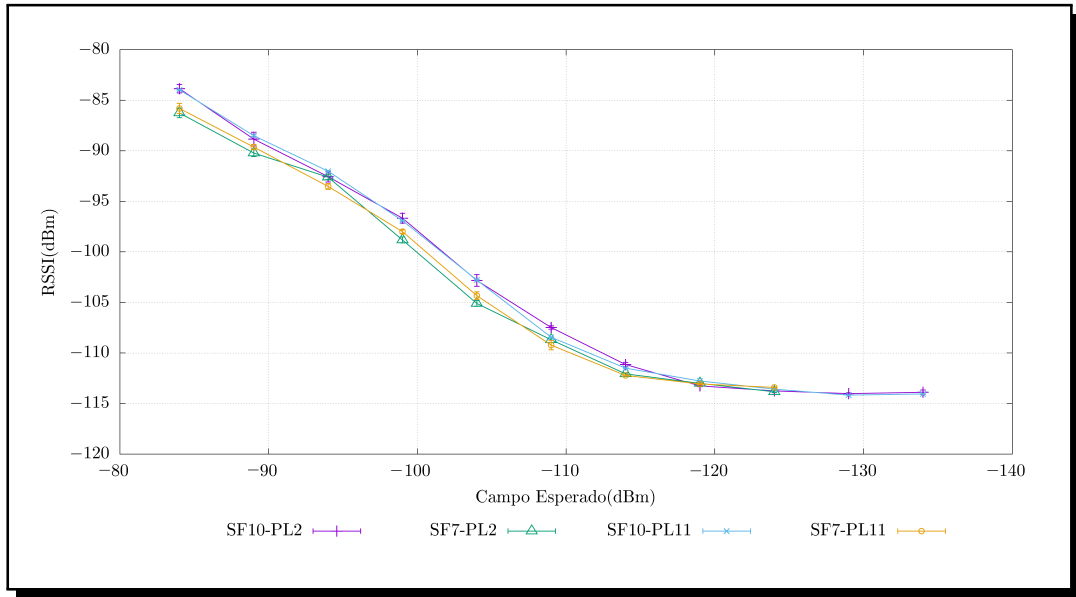


Figura 18: Ambiente 2 antena omnidireccional: RSSI vs Campo Esperado

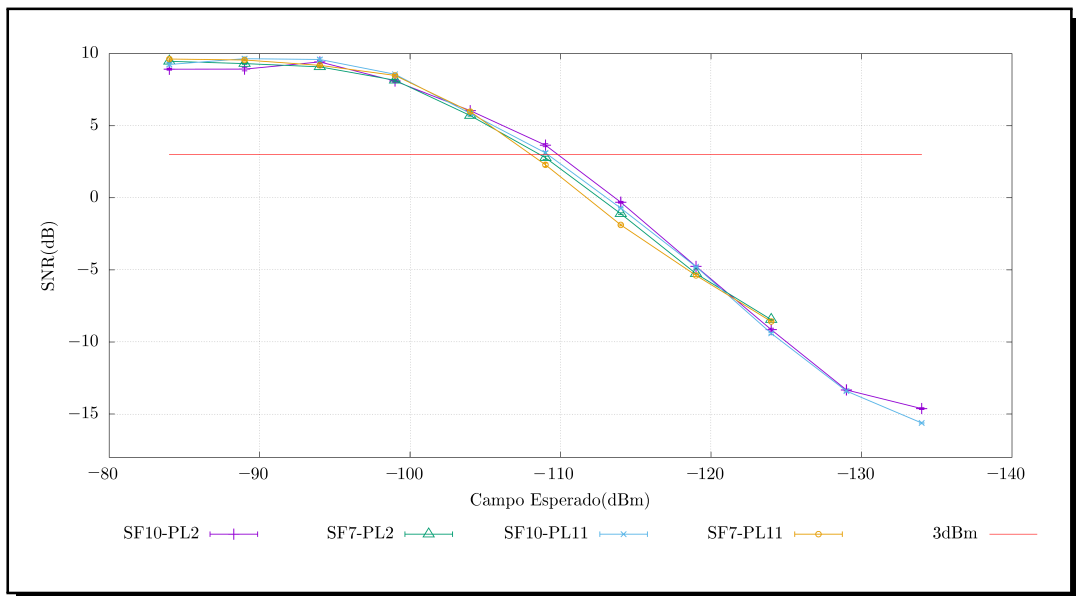


Figura 19: Ambiente 2 antena omnidireccional: SNR vs Campo Esperado

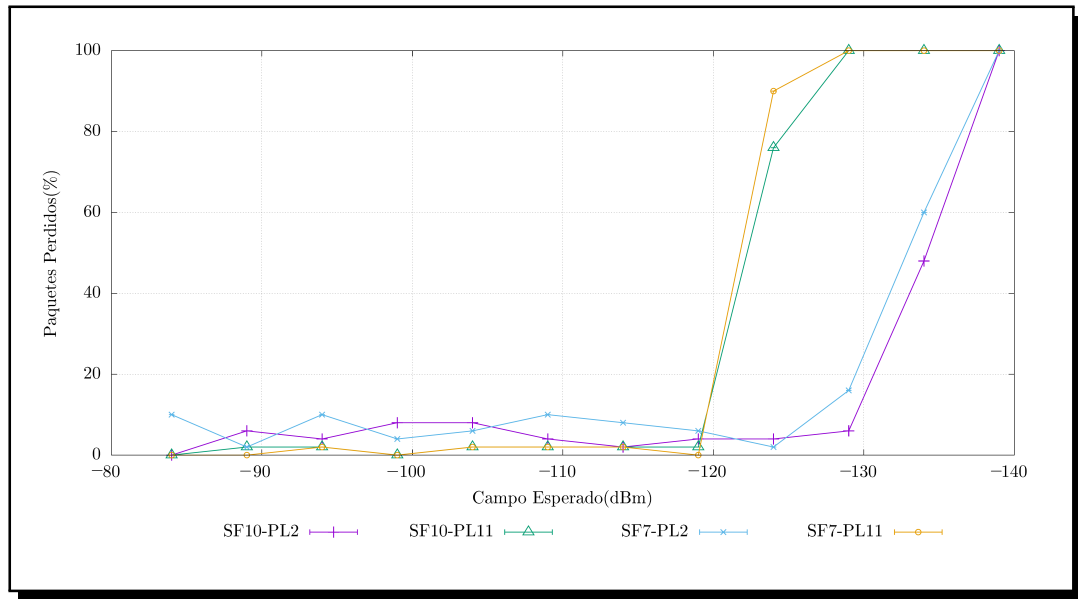


Figura 20: Ambiente 2 antena omnidireccional: PER vs Campo Esperado

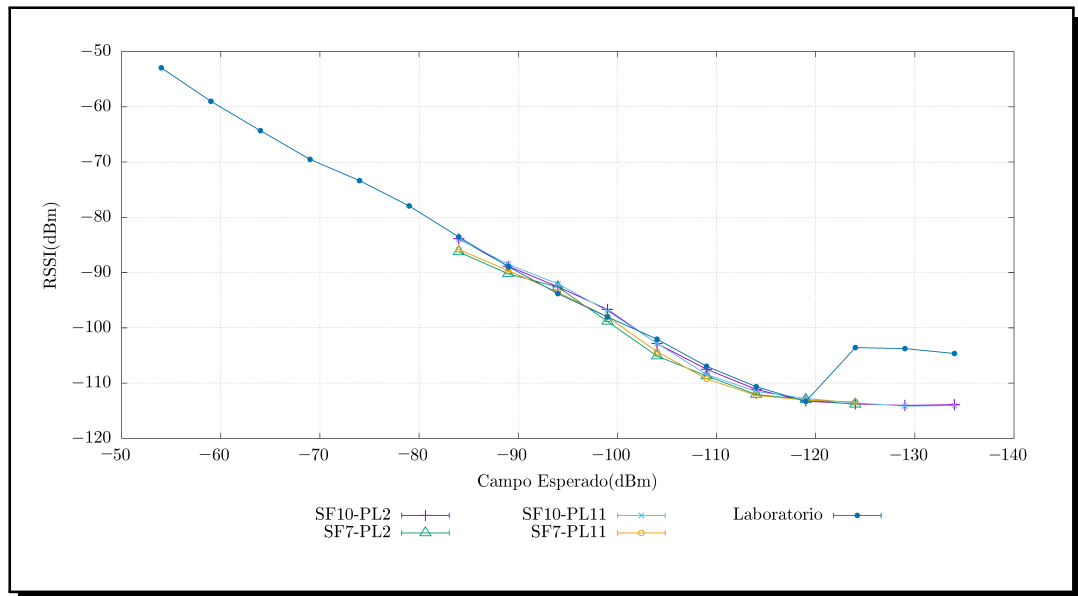


Figura 21: Ambiente 2 antena omnidireccional: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio

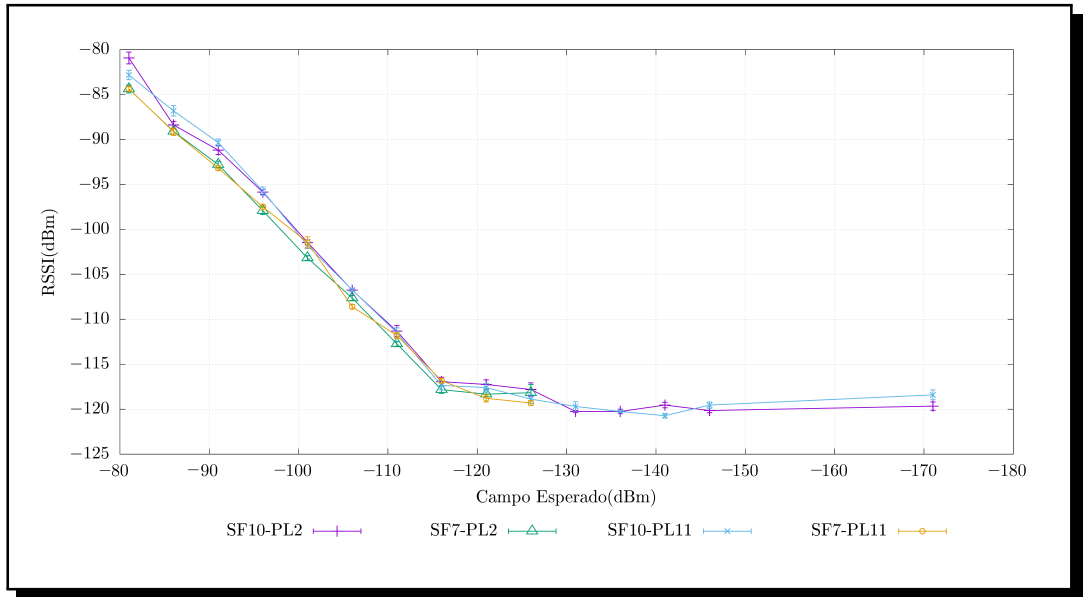


Figura 22: Ambiente 2 antena direccional: RSSI vs Campo Esperado

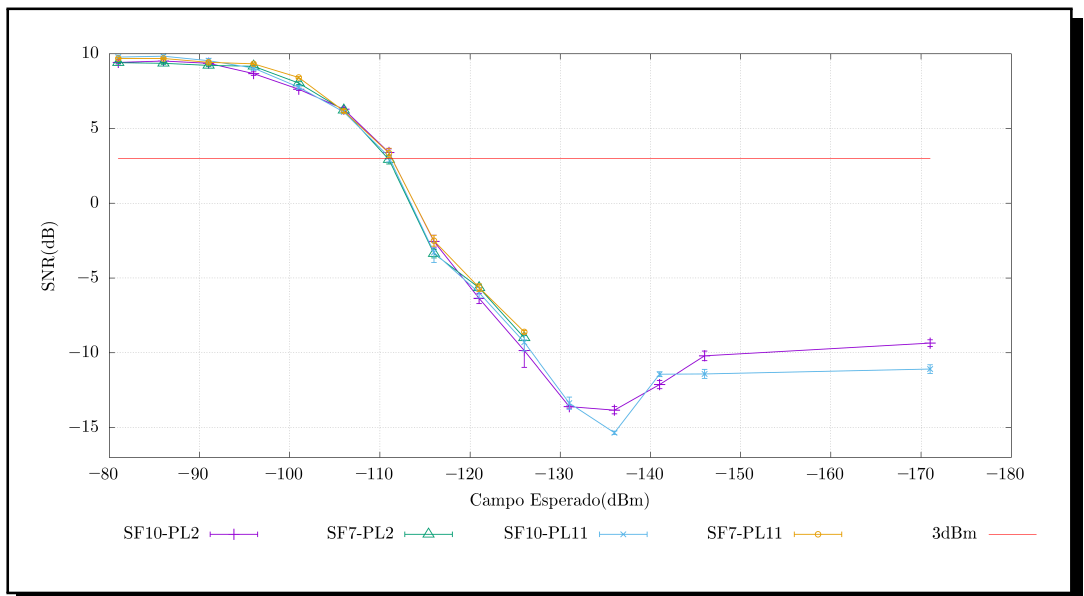


Figura 23: Ambiente 2 antena direccional: SNR vs Campo Esperado

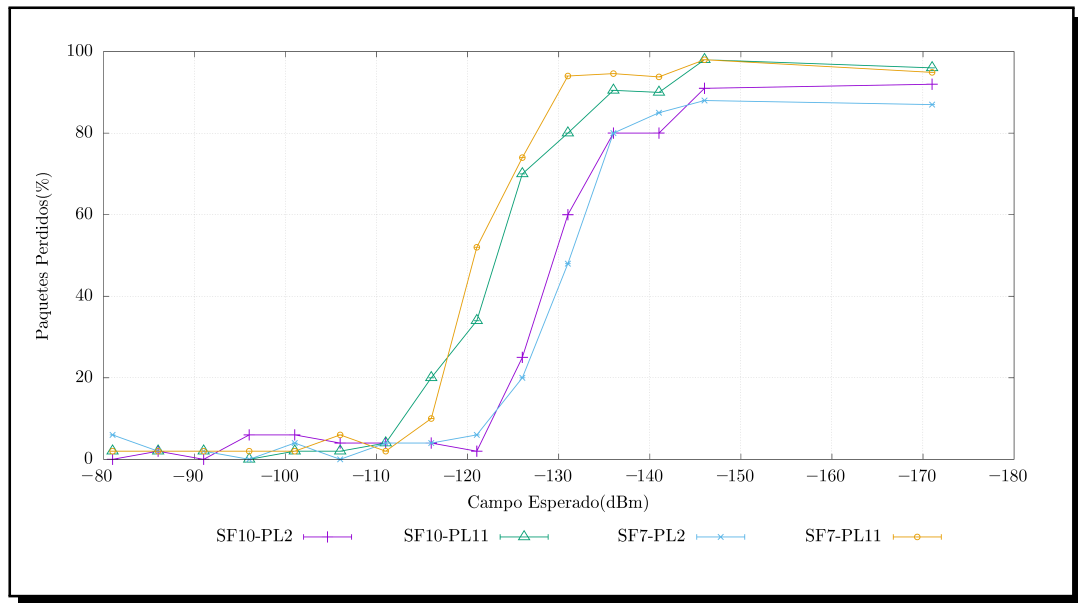


Figura 24: Ambiente 2 antena direccional: PER vs Campo Esperado

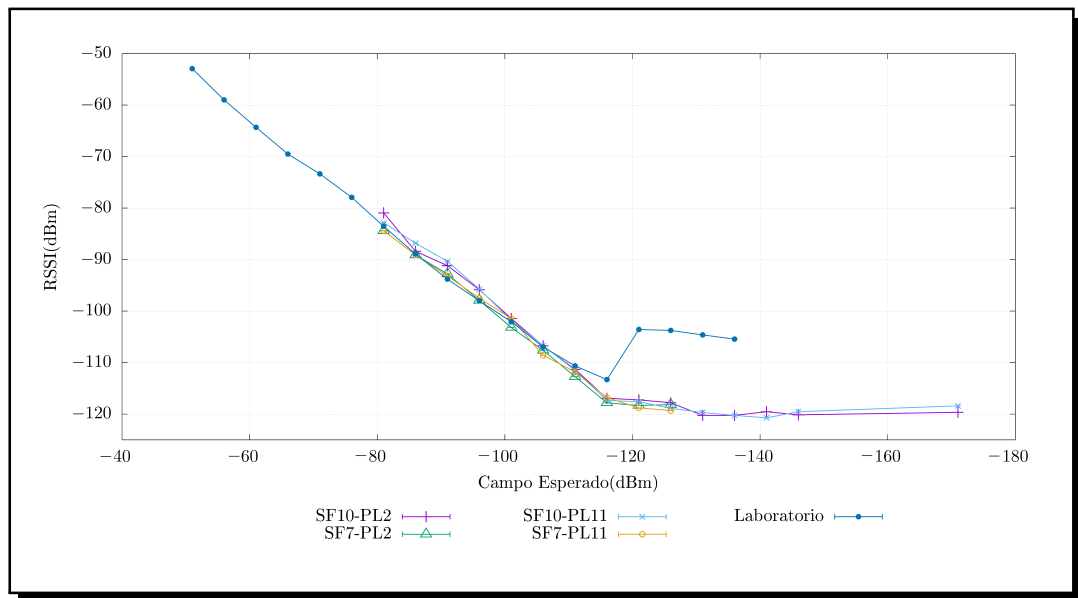


Figura 25: Ambiente 2 antena direccional: Comparación del RSSI con los resultados obtenidos en laboratorio

6. Conclusiones y Recomendaciones

Los resultados obtenidos muestran que los valores de RSSI entregados por el equipo corresponden a los valores de atenuación introducidas en las diferentes pruebas realizadas, este comportamiento se mantiene estable hasta los -110dBm, para valores menores a dicho umbral el equipo entrega valores que no se pueden considerar fiables para su uso en modelos de pérdida de trayectoria.

En las pruebas realizadas dentro de la Universidad de Cuenca existen valores de RSSI que no tienen relación con el campo esperado debido al tráfico de personas cerca del equipo de transmisión, por lo que se obtuvo una diferencia entre 5 y 10 dB de atenuación adicional.

El porcentaje de paquetes perdidos se mantiene estable en aproximadamente el 6 %, este valor empieza a aumentar para cantidades menores de RSSI de -100dBm con factor de ensanchamiento de 7 y valores menores de RSSI de -110dBm con factor de ensanchamiento de 10.

Por otro lado, los resultados no arrojaron diferencias importantes entre el uso de la antena omnidireccional incluida en el paquete de desarrollo LoRa 900 y la antena direccional HG908p-SM, esto se debe a que la frecuencia de resonancia de los dos tipos de antena se encuentra alejada de la frecuencia de transmisión del módulo LoRa.

Se recomienda utilizar un valor de 0 dBi para cualquier cálculo matemático al utilizar el equipo de desarrollo con estas antenas, además el diseño y construcción de antenas con frecuencia de resonancia de 903MHz para la ejecución de proyectos de investigación futuros con dicho módulo.

Referencias

- [1] MICROCHIP, *RN2903 LoRa Technology Module Command Reference User's Guide*, 2015.
- [2] MICROCHIP, *LoRaWAN Specification*, 2015.
- [3] AGILENT TECHNOLOGIES, *Agilent Technologies 8494A/B, 8495A/B, and 8496A/B Attenuators*, 2002.
- [4] AGILENT TECHNOLOGIES, *Agilent 8491A/B, 8493A/B/C, 11581A, 11582A and 11583C*, 2010.
- [5] NATIONAL INSTRUMENTS, *USB-5681 Specifications*, 2010.
- [6] NATIONAL INSTRUMENTS, *Tutorial, ¿Qué es PXI?*, 2017.

- [7] NATIONAL INSTRUMENTS, *Introducción a la Arquitectura PXI*, 2016.
- [8] NATIONAL INSTRUMENTS, *Preguntas Frecuentes sobre PXI Express*, 2012.
- [9] NATIONAL INSTRUMENTS, *Producto, ¿Qué es PXI?*, 2017.

A. Anexo I: Implementación del Servidor LoRa

A.1. Instalación de librería para el descifrado

Para el descifrado de los datos recibidos se utilizó la librería lora-package la cual se encuentra implementada en el lenguaje JavaScript. Los comandos para la instalación de los paquetes necesarios en un sistema operativo basado en Linux son los siguientes.

- `sudo apt-get install npm`
- `npm install -g crypto-js`
- `npm install -g node-aes-cmac`
- `npm install -g lora-packet`
- `npm install -g lora-decrypt`

A.2. Código para el descifrado

El siguiente código debe copiarse a la ruta de instalación de la librería lora-packet con el nombre lora-decrypt.

```
1  #!/usr/bin/env node
2
3  "use strict";
4
5  /**
6   * LoRa Decrypt Code
7   * Ucuencia
8   */
9  var lora_packet = require('../lib/index.js');
10 var cmdlineArgs = process.argv;
11
12 //Start
13 var inputData = new Buffer(cmdlineArgs[2], 'base64');
14 var packet = lora_packet.fromWire(inputData);
15 var AppSKey_hex = "3c8f262739bfe3b7bc0826991ad0504d";
16 var NwkSKey_hex = "2b7e151628aed2a6abf7158809cf4f3c";
17 var decrypted = lora_packet.decrypt(packet, new Buffer(AppSKey_hex,
18   'hex'), new Buffer(NwkSKey_hex, 'hex'));
19 //Output
20 console.log (decrypted)
```

Listing 1: Código de descifrado lora-decrypt

A.3. Código del Servidor

La implementación del servidor se la realizó en el lenguaje de programación Python, el código recibe los datos procedentes del Gateway por la interfaz Ethernet, dichos datos se guardan en un archivo .csv, el nombre de dicho archivo es ingresado al momento de iniciar el código.

```
1 #Este Scrip crea un archivo .csv con las transmisiones procedentes
  del gateway
2 #Creado por : Juan Francisco Peralta Santos
3 #juan.peraltas@ucuenca.ec
4
5 import socket
6 import sys
7 import subprocess
8 import statistics
9 import csv
10 import atexit
11
12 #-----Configuracion de Socket UDP-----
13 port = 1700
14 s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_DGRAM)
15 s.bind(("", port))
16 print "-----"
17 print "-----UNIVERSIDAD DE CUENCA-----"
18 print "-----"
19 print "Escuchando el puerto:", port
20
21
22 #-----Funciones-----
23 def cut_comas(indexD, inicio):
24     index = indexD + 7
25     ban = 0
26     while index <= len(data) and ban == 0:
27         if data[index] == ',':
28             return data[indexD + inicio:index + 1]
29             ban = 1
30         else:
31             index = index + 1
32
33 #-----Comentarios Para el archivo csv-----
34 arch=raw_input("Nombre del Archivo :")
35 pot=raw_input("Potencia de Transmicion :")
36 altura=raw_input("Altura :")
37 payl=raw_input("Payload :")
38
39 #-----Crear csv y escribir titulos de columna-----
40 f = open(arch+'.csv', 'wt')
41 writer = csv.writer(f)
42 writer.writerow(('Potencia', pot, 'Altura', altura, 'Payload', payl))
43 writer = csv.writer(f)
44 writer.writerow((' ', ' ', ' ', ' '))
```

```

45 writer = csv.writer(f)
46 writer.writerow(('Paquete', 'Tmst', 'Frecuencia', 'Canal', 'RFCanal', '
    DatTrans', 'Tamano', 'RSSI', 'SNR', 'Encode DATA', 'DATA'))
47 print "Esperando datos ....."
48
49 #----- Recibir datos del socket,desencriptar y guardar en csv
    -----
50 try:
51     con=0 #Contador de numero de paquetes recibidos
52     while 1:
53         data, addr = s.recvfrom(1024)
54         longitud = len(data)
55         if longitud >= 150:
56             con = con + 1
57             long = len(data)
58             tmstp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('tmst')]
59             freqp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('freq')]
60             chanp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('chan')]
61             rfchp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('rfch')]
62             rssip = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('rssi')]
63             datap = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('data')]
64             datrp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('datr')]
65             sizep = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('size')]
66             lsnrp = [pos for pos in range(len(data)) if data[pos:].
                startswith('lsnr')]
67             tmst = cut_comas(tmstp[0],4)
68             datos=cut_comas(datap[0],6)
69             datr = cut_comas(datr[0],6)
70             rssi=cut_comas(rssip[0],4)
71             freq=cut_comas(freqp[0],4)
72             size = cut_comas(sizep[0],4)
73             chan = cut_comas(chanp[0],4)
74             rfch = cut_comas(rfchp[0],4)
75             snr=cut_comas(lsnrp[0],4)
76             datosdec = subprocess.check_output('nodejs /usr/local/
                lib/node_modules/lora-packet/bin/lora-decrypt ' +
                datos, shell=True).decode('utf-8')
77             writer = csv.writer(f)
78             writer.writerow((con,tmst[2:-2],freq[2:9],chan[2],rfch
                [2],datr[1:-2],size[2:-2],rssi[2:-2],snr[2:-2],datos
                [1:-1],datosdec[8:-2]))
79             print "PAQUETE:"+str(con)+" == "+" Freq:"+freq[2:9]+"
                RSSI:"+rssi[2:-2]+" SNR:"+snr[2:-2]+" Size:"+size
                [2:-2]+" Data:"+datosdec[8:-2]

```

```

80 #----- Cerrar socket y archivo csv -----
81 finally:
82     print "Finalizando....."
83     s.close()
84     f.close()

```

Listing 2: Código del Servidor

B. Anexo II: Código del Transmisor

El código para la transmisión de datos se la realizo en el lenguaje de programación Python, este código envía las configuraciones y peticiones al nodo por medio de una interfaz serial USB.

```

1  import serial
2  import time
3  import sys
4
5  # import RPi.GPIO as GPIO
6  LedPin = 11  # pin11
7
8  BAUD_RATE = 57600
9
10
11 class LoRaSerial(object):
12     def __init__(self, _serial_port):
13         '''
14             configures serial connection
15         '''
16         self._ser = serial.Serial(_serial_port, BAUD_RATE)
17
18         # timeout block read
19         self._ser.timeout = 8
20
21         # disable software flow control
22         self._ser.xonxoff = False
23
24         # disable hardware (RTS/CTS) flow control
25         self._ser.rtscts = False
26
27         # disable hardware (DSR/DTR) flow control
28         self._ser.dsrtdtr = False
29
30         # timeout for write
31         self._ser.writeTimeout = 0
32
33         # print "Resetting LoRa Tranceiver..."
34         self.write_command('sys reset', False)
35         # print "Configuring Tranceiver..."
36         # Mac Configuration

```

```

37     self.write_command('mac set devaddr 001AD314')
38     self.write_command('mac set appskey 3
39         C8F262739BFE3B7BC0826991AD0504D')
40     self.write_command('mac set nwkskey 2
41         B7E151628AED2A6ABF7158809CF4F3C')
42     self.write_command('mac set adr off')
43     self.write_command('mac set sync 34')
44     self.write_command('mac set pwridx 10')
45     self.write_command('mac set dr 0')
46     self.write_command('mac save')
47
48     # Configure sub-bands
49     for ch in range(0, 63):
50         self.write_command('mac set ch status %d %s' % (ch, 'on'
51             if ch in range(0, 7) else 'off'))
52
53     # join the network
54     # print "Attempting to Join Network..."
55     self.write_command('mac join abp')
56     response = self.read()
57     if response == 'accepted':
58         print "LoRa Tranceiver Configured. Joined (ABP)"
59     else:
60         print "ERROR: mac join returned unexpected response: ",
61             response
62
63 def read(self):
64     '''
65     reads serial input
66     '''
67     return self._ser.readline().strip()
68
69 def write(self, str):
70     '''
71     writes out string to serial connection, returns response
72     '''
73     self._ser.write(str + '\r\n')
74     return self.read()
75
76 def write_command(self, config_str, check_resp=True):
77     '''
78     writes out a command
79     '''
80     # print "Command: '%s'" % config_str
81     response = self.write(config_str)
82     if check_resp and response != 'ok':
83         print "Command: '%s'" % config_str
84         print "Response: '%s'" % response
85
86 def send_message(self, data):
87     '''
88     sends a message to gateway

```

```

85         '''
86         # print "Sending message... "
87         # send packet (returns 'ok' immediately)
88         self.write_command('mac tx uncnf 5 ' + data)
89         # wait for success message
90         response = self.read()
91         if response == 'mac_tx_ok':
92             print "Message sent successfully!"
93         else:
94             print "ERROR: mac tx command returned unexpected
95                   response: ", response
96
97     def receive_message(self):
98         '''
99         waits for a message
100        '''
101        pass
102
103 if __name__ == "__main__":
104
105     port = '/dev/ttyACM0'
106     packets = 100
107     loramote = LoRaSerial(port)
108     data = "un"
109     print data.encode("hex")
110     for i in range(1, packets + 1):
111         loramote.send_message(data.encode("hex"))

```

Listing 3: Código del Transmisor



Apéndice B

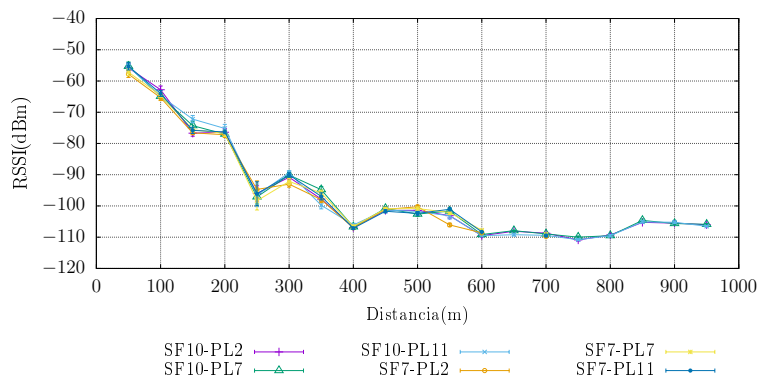
Mediciones de RSSI y SNR

Este apéndice se expone las medidas de [RSSI](#), [SNR](#) y [PER](#) para cada ambiente estudiado, cada punto en las gráficas corresponde a la media e intervalo de confianza del 95 % de la variable analizada.

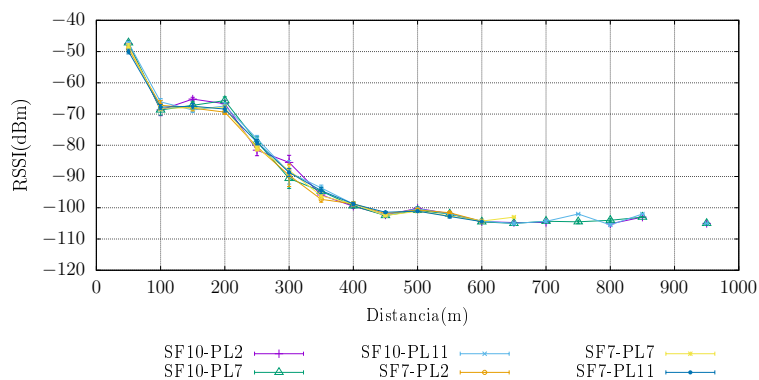


B.1. Mediciones del Ambiente 1: Río Tomebamba

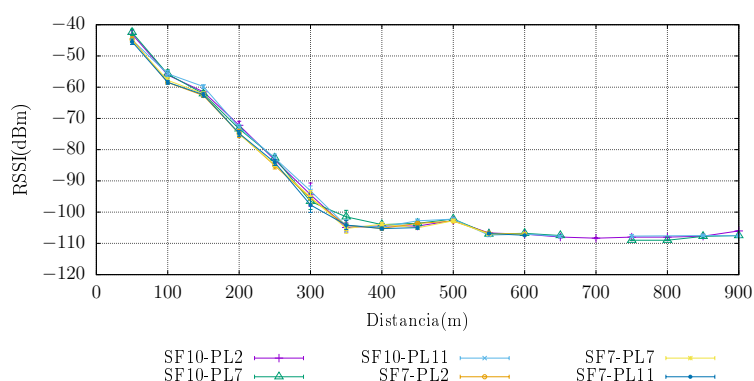
B.1.1. Datos de RSSI



(a) 1m de altura

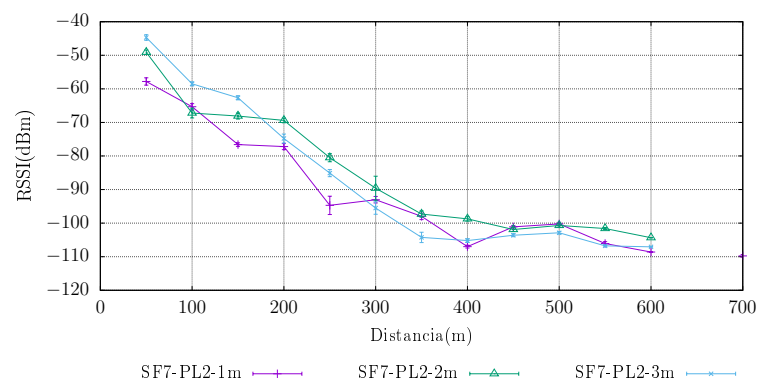


(b) 2m de altura

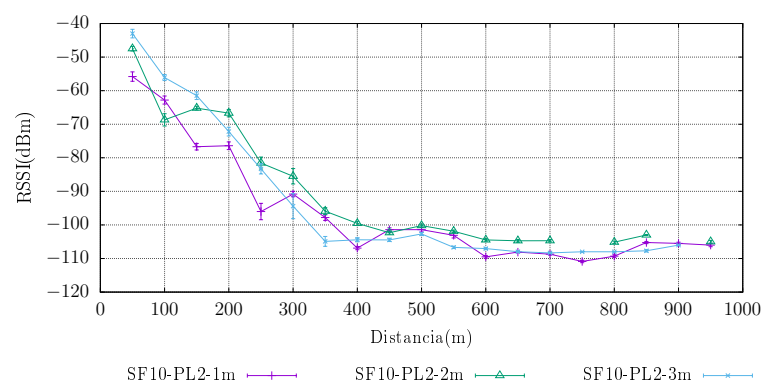


(c) 3m de altura

Figura B.1: RSSI Río Tomebamba



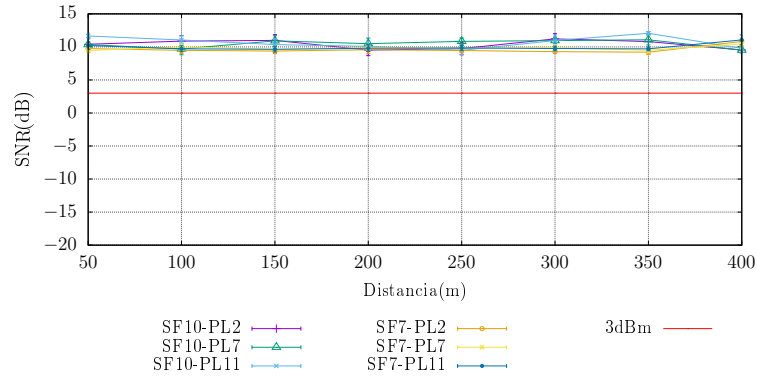
(a) Configuraciones SF7



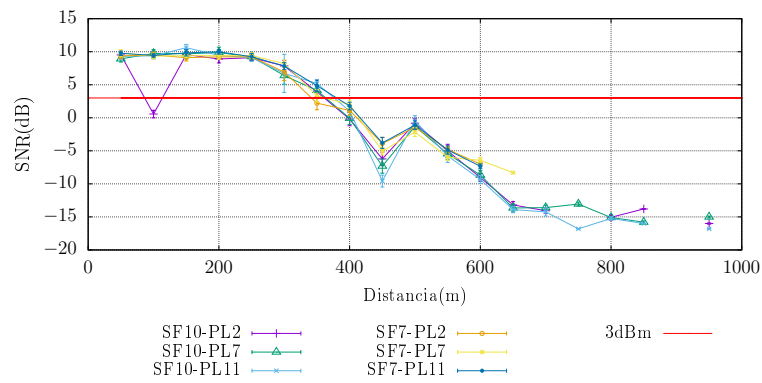
(b) Configuraciones SF10

Figura B.2: Comparación de RSSI entre alturas Río Tomebamba

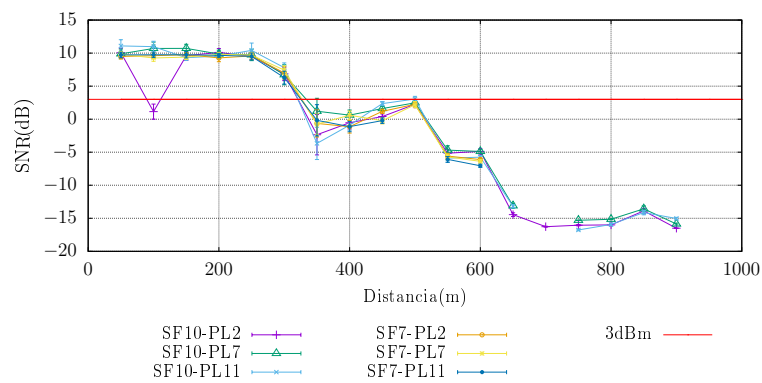
B.1.2. Datos de SNR



(a) 1m de altura



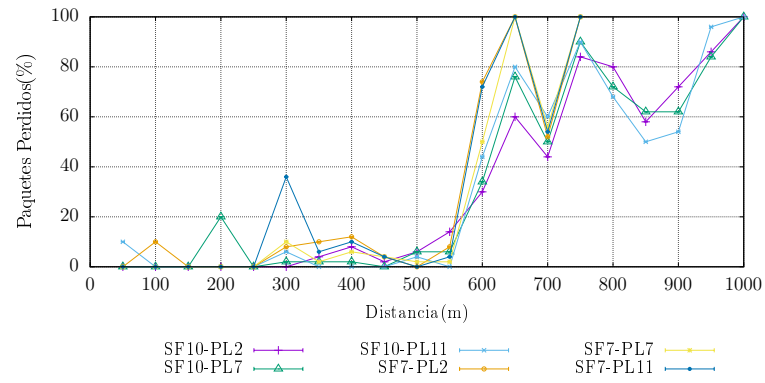
(b) 2m de altura



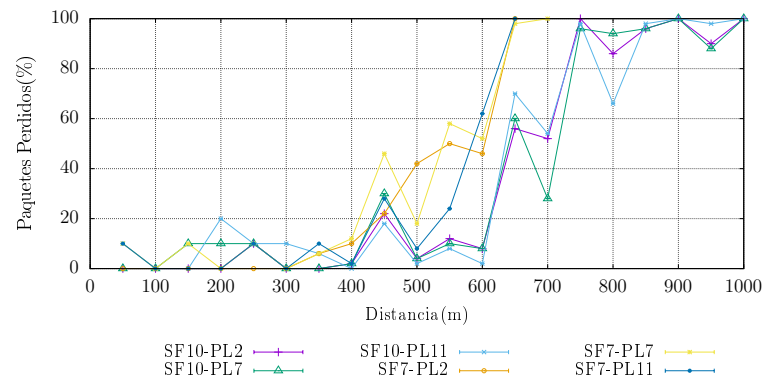
(c) 3m de altura

Figura B.3: SNR Río Tomebamba

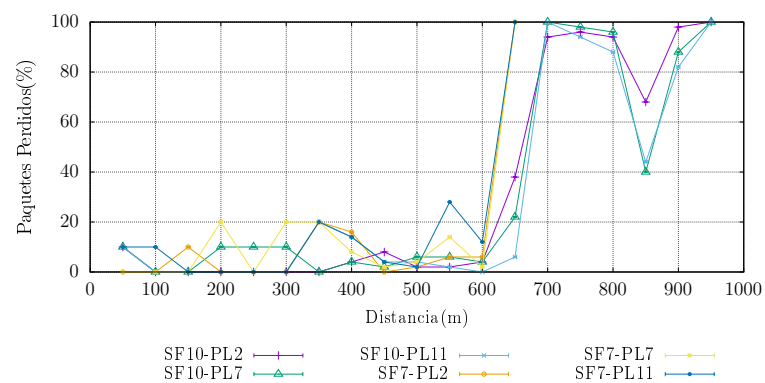
B.1.3. Datos de PER



(a) 1m de altura

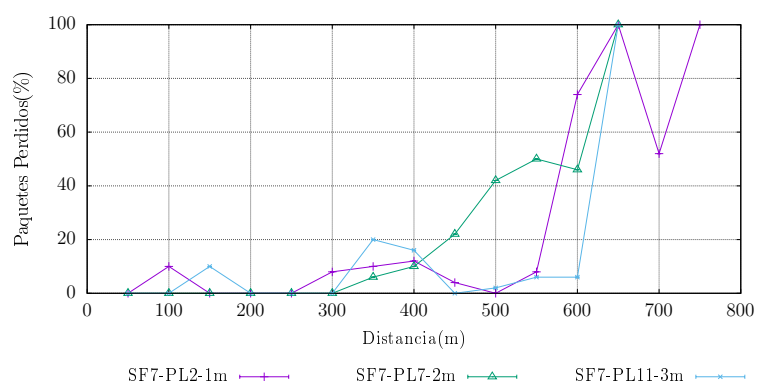


(b) 2m de altura

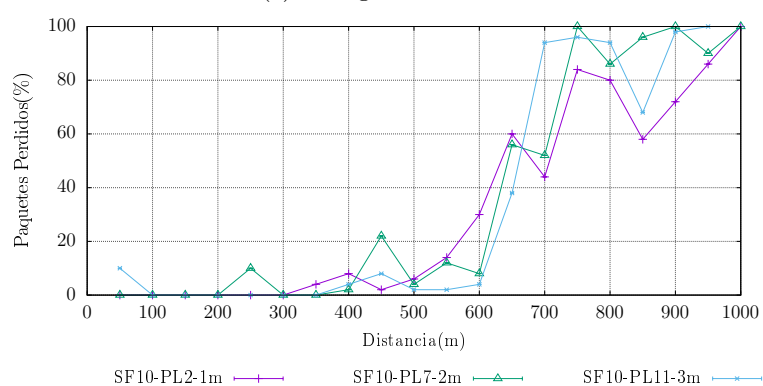


(c) 3m de altura

Figura B.4: PER Río Tomebamba



(a) Configuraciones SF7



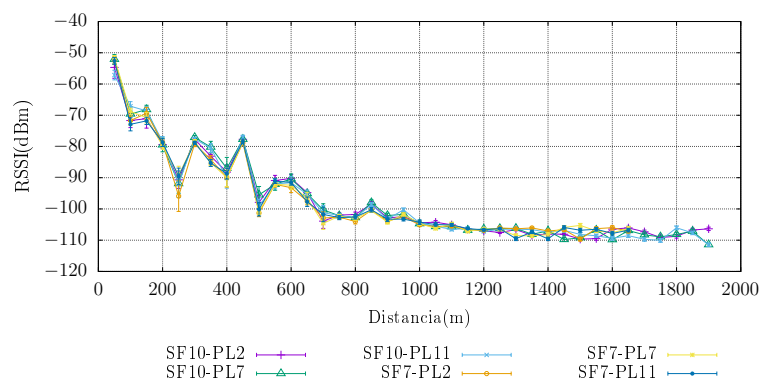
(b) Configuraciones SF10

Figura B.5: Comparación de PER entre alturas Río Tomebamba

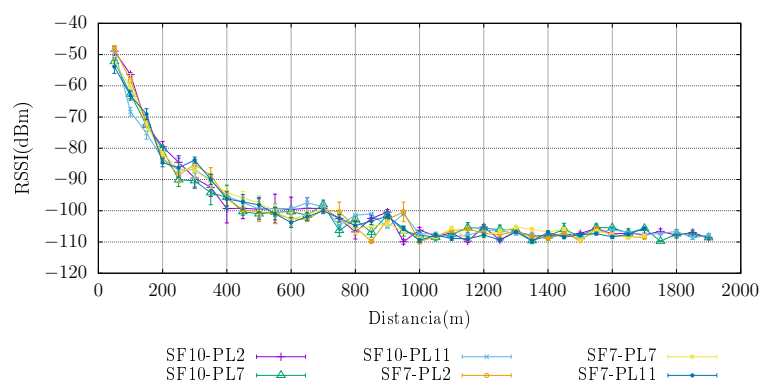


B.2. Mediciones del Ambiente 2 : Río Machángara

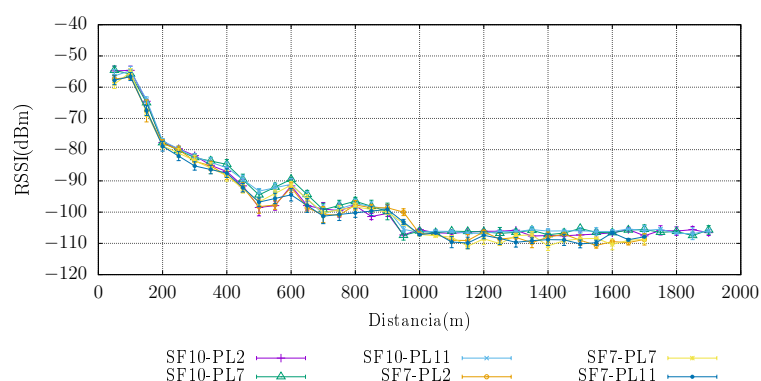
B.2.1. Datos de RSSI



(a) 1m de altura

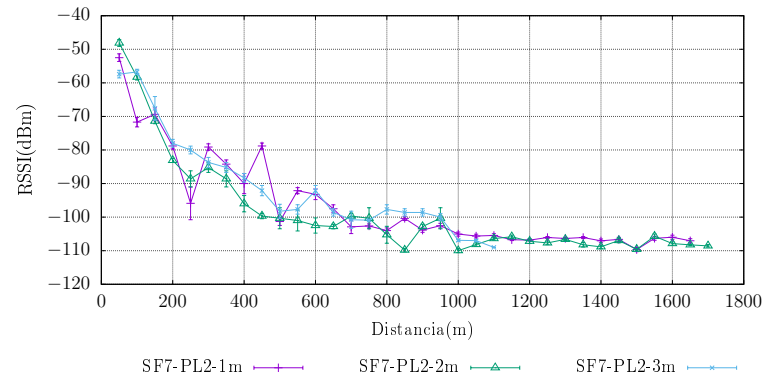


(b) 2m de altura

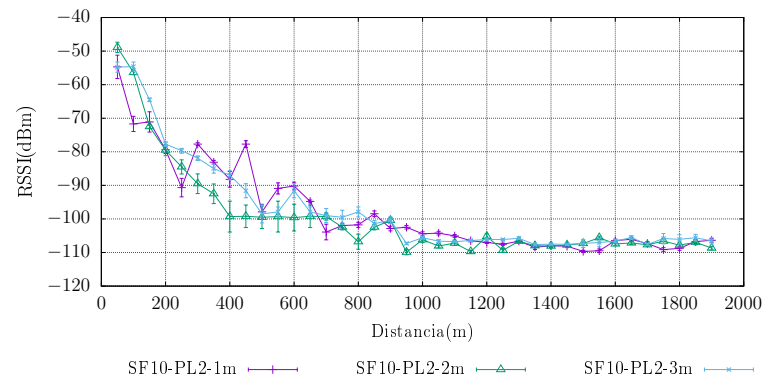


(c) 3m de altura

Figura B.6: RSSI Río Machángara



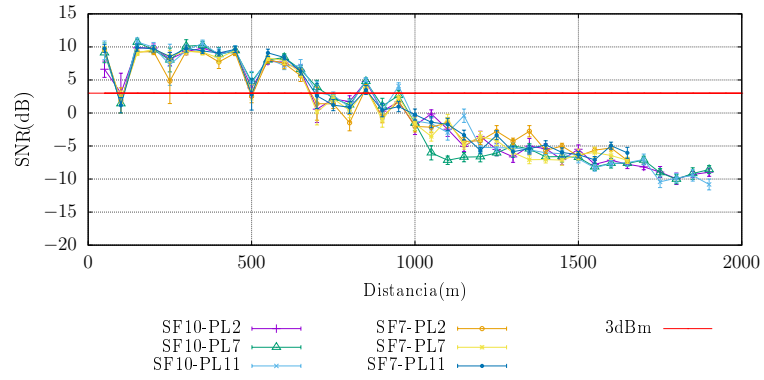
(a) Configuraciones SF7



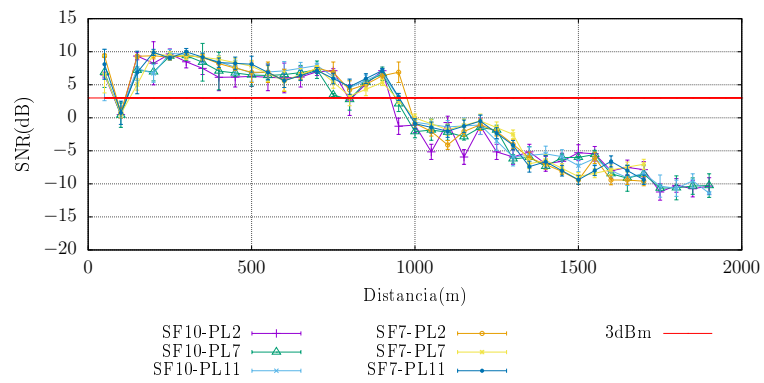
(b) Configuraciones SF10

Figura B.7: Comparación de RSSI entre alturas Río Machángara

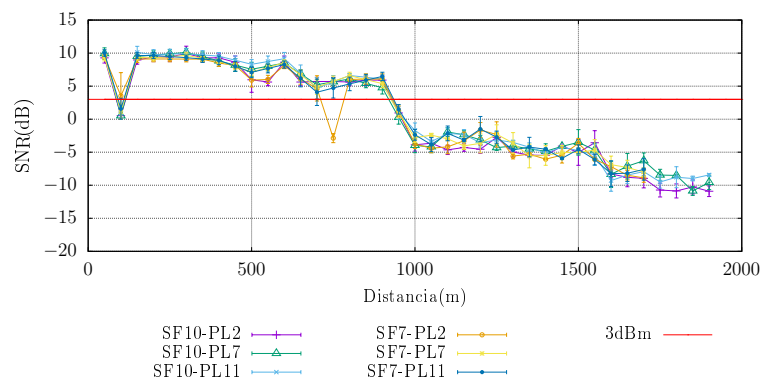
B.2.2. Datos de SNR



(a) 1m de altura



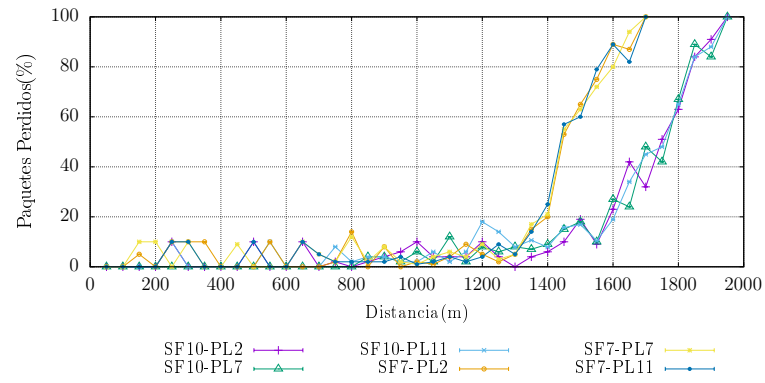
(b) 2m de altura



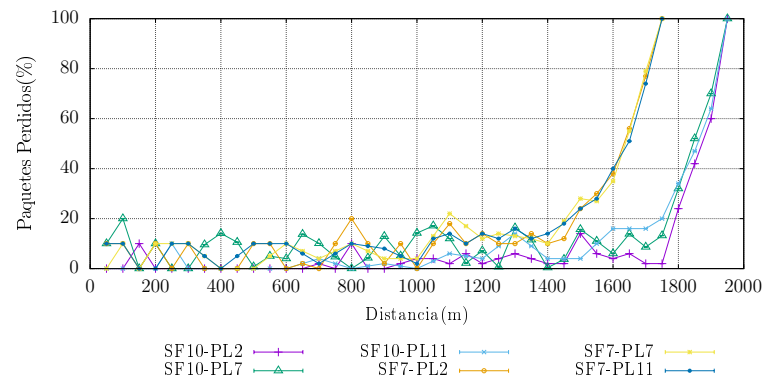
(c) 3m de altura

Figura B.8: SNR Río Machángara

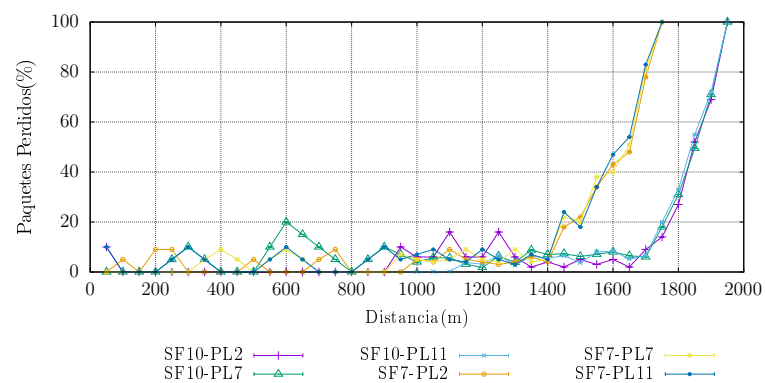
B.2.3. Datos de PER



(a) 1m de altura

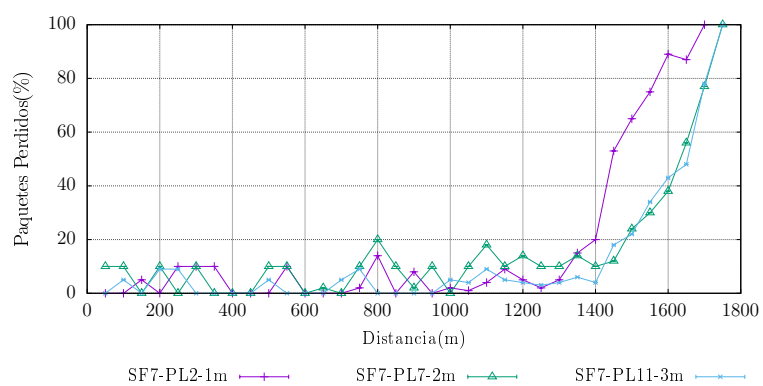


(b) 2m de altura

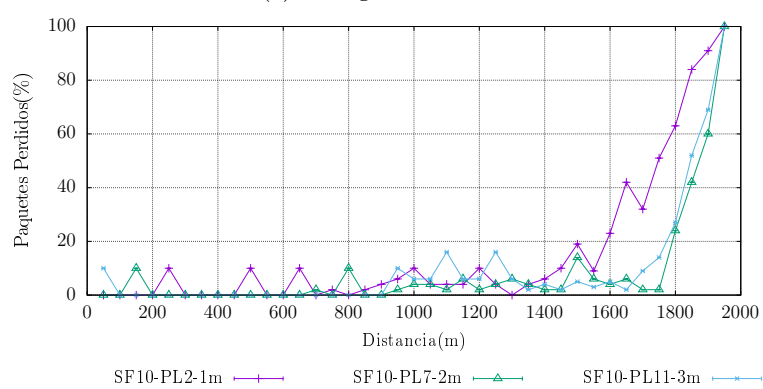


(c) 3m de altura

Figura B.9: PER Río Machángara



(a) Configuraciones SF7



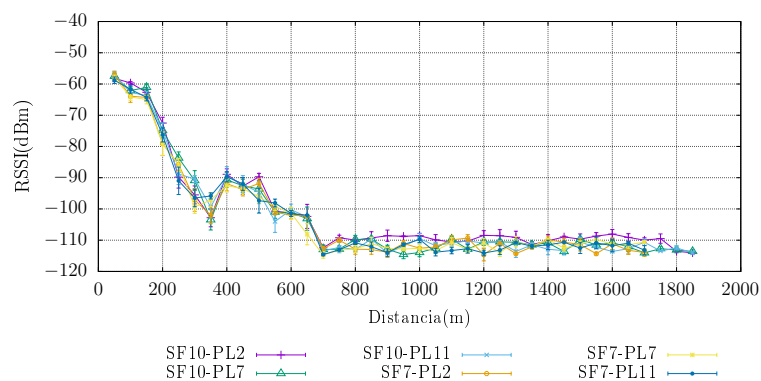
(b) Configuraciones SF10

Figura B.10: Comparación de PER entre alturas Río Machángara

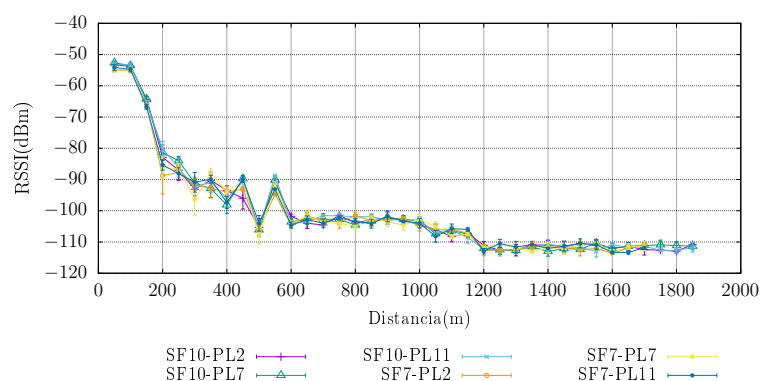


B.3. Mediciones del Ambiente 3 : Río Paute

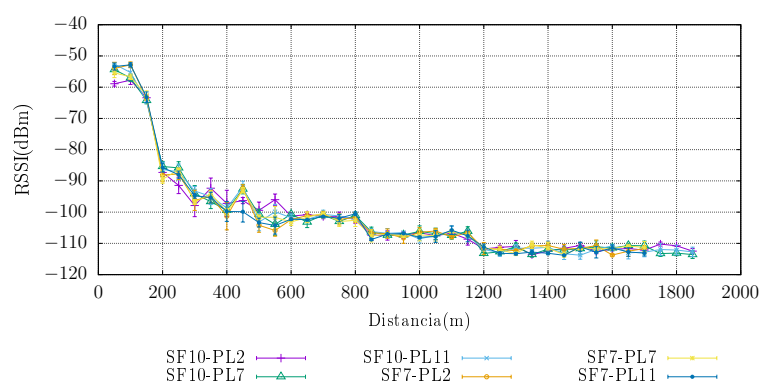
B.3.1. Datos de RSSI



(a) 1m de altura

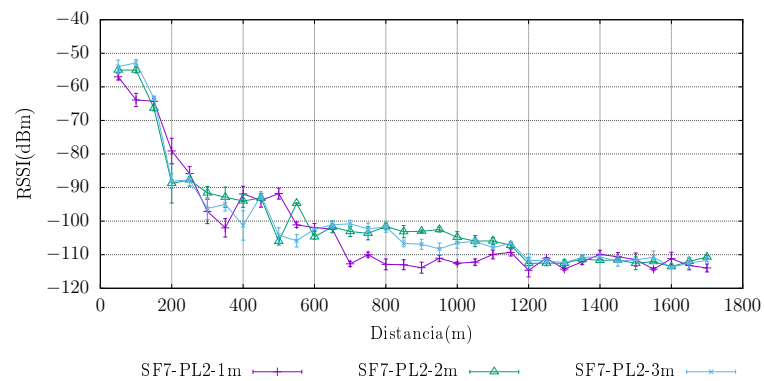


(b) 2m de altura

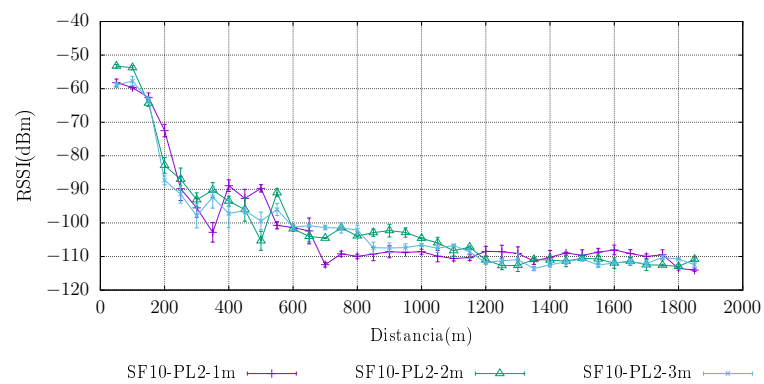


(c) 3m de altura

Figura B.11: RSSI Río Paute



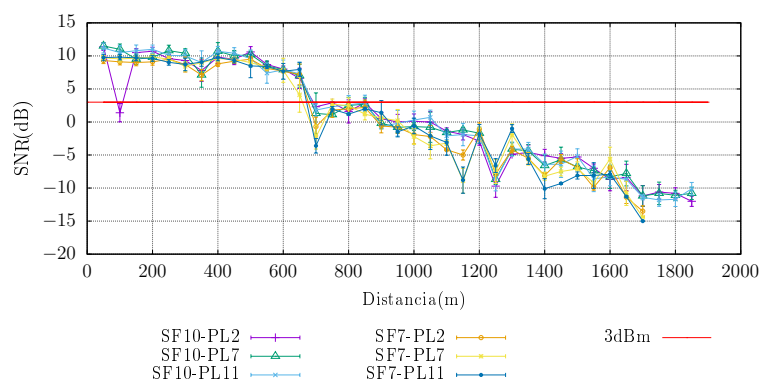
(a) Configuraciones SF7



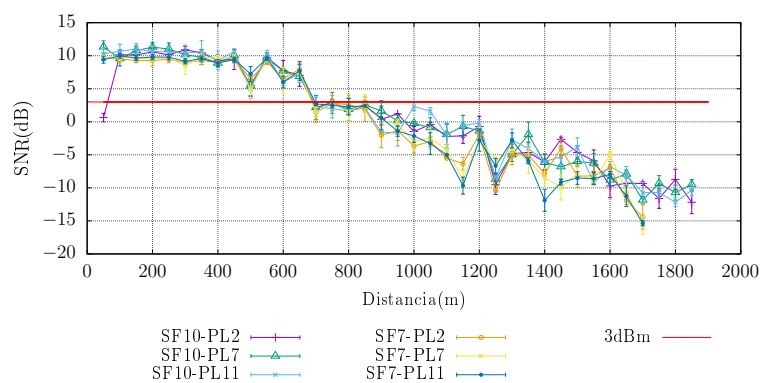
(b) Configuraciones SF10

Figura B.12: Comparación de RSSI entre alturas Río Paute

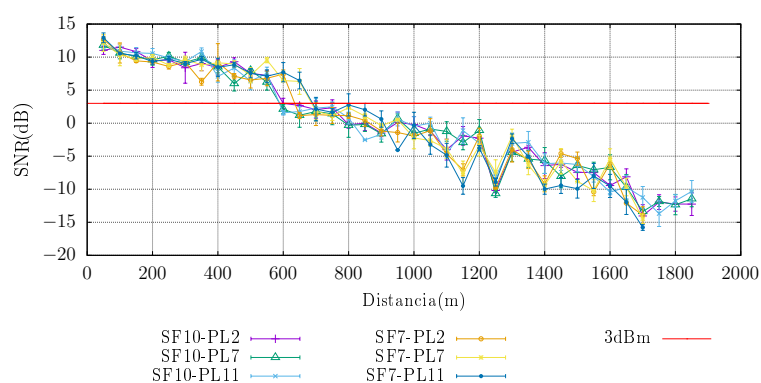
B.3.2. Datos de SNR



(a) 1m de altura



(b) 2m de altura

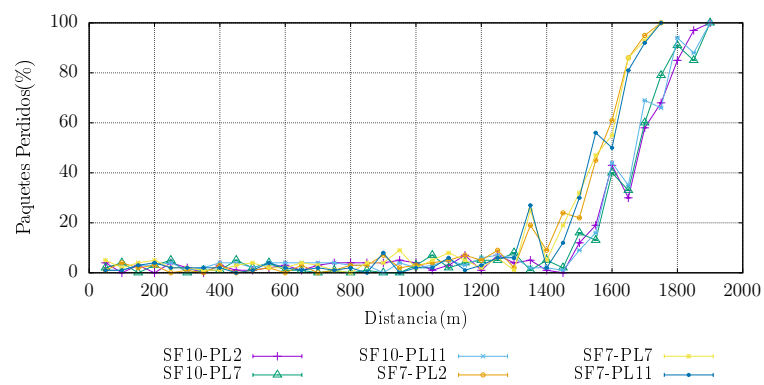


(c) 3m de altura

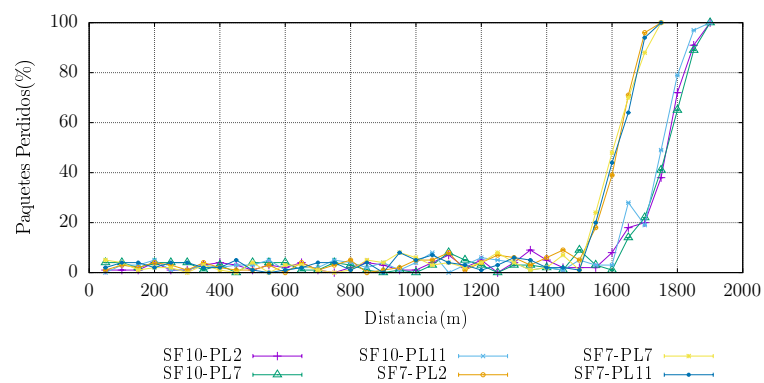
Figura B.13: SNR Río Paute



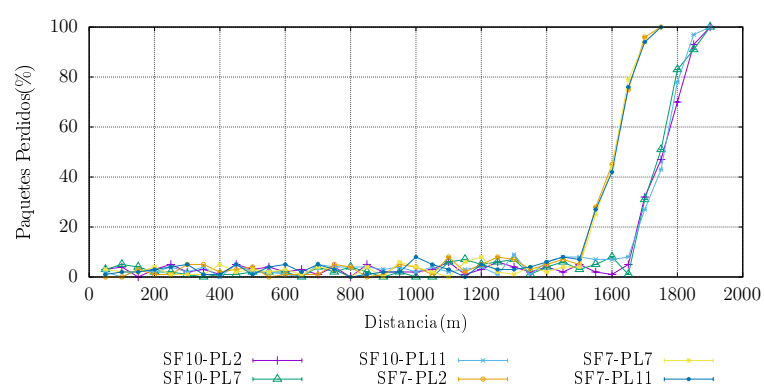
B.3.3. Datos de PER



(a) 1m de altura

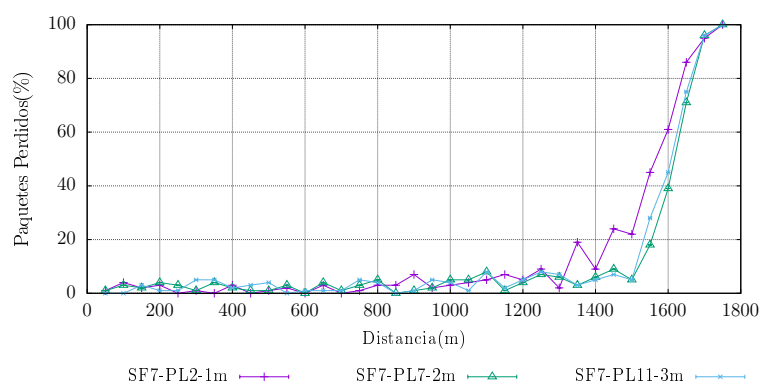


(b) 2m de altura

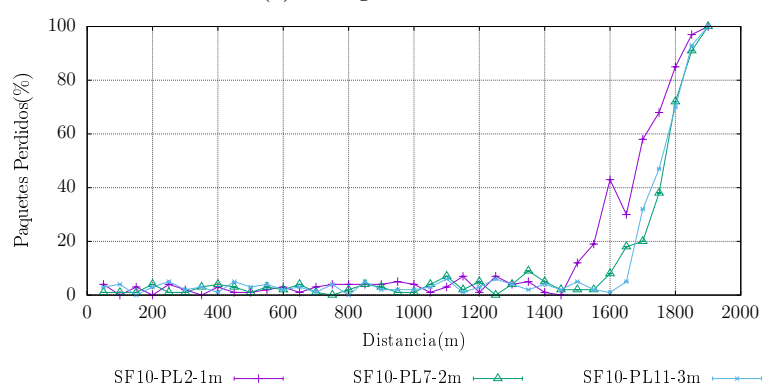


(c) 3m de altura

Figura B.14: PER Río Paute



(a) Configuraciones SF7



(b) Configuraciones SF10

Figura B.15: Comparación de PER entre alturas Río Paute



Bibliografía

- [1] K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, y F. Meyer, “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment,” *ICT Express*, jan 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517302953>
- [2] LoRa Alliance, “A technical overview of LoRa[®] and LoRaWAN[™],” 2015. [En línea]. Disponible: <https://loro-alliance.org/sites/default/files/2018-04/what-is-lorawan.pdf>
- [3] “LoRa[®] Technology Evaluation Suite User’s Guide.” [En línea]. Disponible: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/40001847A.pdf>
- [4] J.-P. Bardyn, T. Melly, O. Seller, y N. Sornin, “IoT: The era of LPWAN is starting now,” in *ESSCIRC Conference 2016: 42nd European Solid-State Circuits Conference*. IEEE, sep 2016, pp. 25–30. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7598235/>
- [5] SEMTECH, “LoRa[™] Modulation Basics,” Tech. Rep., 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.semtech.com/uploads/documents/an1200.22.pdf>
- [6] LoRa Alliance, “LoRaWAN Regional Parameters v1.0,” Tech. Rep., 2016. [En línea]. Disponible: <https://loro-alliance.org/sites/default/files/2018-04/lorawantm{ }regional{ }parameters{ }v1.1rb{ }- { }final.pdf>
- [7] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, y M. Palaniswami, “Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, num. 7, pp. 1645–1660, sep 2013. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X13000241>
- [8] “Introducción a las redes de sensores inalámbricas.” [En línea]. Disponible: <http://www.mfbarcell.es/conferencias/wsn.pdf>
- [9] F. Astudillo y A. Vázquez, “Aplicación de tecnologías inalámbricas al sistema de predicción de caudales en la cuenca del río Tomebamba,” pp. 1–10, 2016.
- [10] G. Chamorro, “Guía de Hidrometría de Aguas Superficiales,” 2008. [En línea]. Disponible: <http://www.senamhi.gob.pe/pdf/aprendiendohidrometria.pdf>



- [11] P. E. Avila Campos, "Evaluación del rango de transmisión de LoRa para redes de sensores inalámbricas con LoRaWAN en ambientes forestales," 2017. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28504>
- [12] J. Petajajarvi, K. Mikhaylov, M. Hamalainen, y J. Iinatti, "Evaluation of LoRa LPWAN technology for remote health and wellbeing monitoring," in *2016 10th International Symposium on Medical Information and Communication Technology (ISMICT)*. IEEE, mar 2016, pp. 1–5. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7498898/>
- [13] L. Vangelista, A. Zanella, y M. Zorzi, "Long-Range IoT Technologies: The Dawn of LoRa™." Springer, Cham, sep 2015, pp. 51–58. [En línea]. Disponible: http://link.springer.com/10.1007/978-3-319-27072-2{ }_7
- [14] R. S. Sinha, Y. Wei, y S.-H. Hwang, "A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT," *ICT Express*, vol. 3, num. 1, pp. 14–21, mar 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405959517300061>
- [15] M. C. Bor, U. Roedig, T. Voigt, y J. M. Alonso, "Do LoRa Low-Power Wide-Area Networks Scale?" in *Proceedings of the 19th ACM International Conference on Modeling, Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems - MSWiM '16*. New York, New York, USA: ACM Press, 2016, pp. 59–67. [En línea]. Disponible: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2988287.2989163>
- [16] D.-L. Yang, F. Liu, y Y.-D. Liang, "A Survey of the Internet of Things," *Proceedings of the 1st International Conference on E-Business Intelligence (ICEBI2010)*, vol. 54, num. 15, pp. 358–366, 2010. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
- [17] D. Miorandi, S. Sicari, F. De Pellegrini, y I. Chlamtac, "Internet of things: Vision, applications and research challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 10, num. 7, pp. 1497–1516, 2012. [En línea]. Disponible: <http://dx.doi.org/10.1016/j.adhoc.2012.02.016>
- [18] European Commission, *Cities of tomorrow*, 2003, num. October.
- [19] D. Evans, "The Internet of Things: How the Next Evolution of the Internet Is Changing Everything." [En línea]. Disponible: <https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/34766160/internet-of-things-iot-ibsg.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A{&}Expires=1528061007{&}Signature=nvLzgwNFZN5t{ }2B{ }2F2rSQHdAGIYHFA{ }3D{&}response-content-disposition=inline{ }3Bfilename{ }3DInternet-of-thin>
- [20] A. Cama Pinto, E. De la Hoz Franco, y D. Cama Pinto, "Las redes de sensores inalámbricos y el internet de las cosas," *Inge Cuc*, vol. 8, num. 1, pp. 163–172, 2012. [En línea]. Disponible: <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4869014{&}info=resumen{&}idioma=SPA>

- [21] A. Zanella y M. Zorzi, “Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios,” *IEEE Wireless Communications*, num. October, pp. 60–67, 2016.
- [22] L. Vangelista, “Frequency Shift Chirp Modulation: The LoRa Modulation,” *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 24, num. 12, pp. 1818–1821, dec 2017. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8067462/>
- [23] J. Skog Andersen y J. Eriksson, “Investigating the practical performance of the LoRaWAN technology,” 2017. [En línea]. Disponible: <http://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1175407&dswid=8104>
- [24] Consejo Nacional De Telecomunicaciones, “Plan Nacional de Frecuencias Ecuador,” Tech. Rep., 2012. [En línea]. Disponible: http://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/07/plan{}_nacional{}_frecuencias{}_2012.pdf
- [25] S.-K. Park, K.-i. Hwang, H.-S. Kim, y B.-S. Shim, “Challenges and Experiment with LoRaWAN.” Springer, Singapore, may 2017, pp. 269–276. [En línea]. Disponible: http://link.springer.com/10.1007/978-981-10-5041-1{}_46
- [26] LoRa Alliance, “LoRa Specification,” Tech. Rep., 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.rs-online.com/designspark/rel-assets/ds-assets/uploads/knowledge-items/application-notes-for-the-internet-of-things/LoRaWANSpecification1R0.pdf>
- [27] Y. H. Lee y Y. S. Meng, “Further investigation of empirical path-loss modeling for short forested paths,” *IEEE Antennas and Propagation Society, AP-S International Symposium (Digest)*, num. 1, pp. 7–8, 2012.
- [28] S. Henna y A. Akhunzada, “Evaluation of Propagation Path Delay Using 3D Scattered Model in LoRaWAN Evaluation of Propagation Path Delay Using 3D Scattered Model in LoRaWAN,” num. April, 2018.
- [29] S. Hosseinzadeh, M. Almoathen, H. Larijani, y K. Curtis, “A Neural Network Propagation Model for LoRaWAN and Critical Analysis with Real-World Measurements,” *Big Data and Cognitive Computing*, vol. 1, num. 1, p. 7, dec 2017. [En línea]. Disponible: <http://www.mdpi.com/2504-2289/1/1/7>
- [30] Iswandi, H. T. Nastiti, I. E. Praditya, y I. W. Mustika, “Evaluation of XBee-Pro transmission range for Wireless Sensor Network’s node under forested environments based on Received Signal Strength Indicator (RSSI),” in *2016 2nd International Conference on Science and Technology-Computer (ICST)*. IEEE, oct 2016, pp. 56–60. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7877347/>
- [31] M. Aref y A. Sikora, “Free space range measurements with Semtech LoRa technology,” in *2014 2nd International Symposium on Wireless Systems within*



- the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, IDAACS-SWS 2014*. IEEE, sep 2014, pp. 19–23. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6954616/>
- [32] J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, A. Roivainen, T. Hänninen, y M. Pettissalo, “On the Coverage of {LPWANs:} Range Evaluation and Channel Attenuation Model for {LoRa} Technology,” *2015 14th Int Conf Telecommun Itst*, pp. 55–59, 2015.
- [33] T. Rama Rao, D. Balachander, A. Nanda Kiran, y S. Oscar, “RF propagation measurements in forest & plantation environments for Wireless Sensor Networks,” *International Conference on Recent Trends in Information Technology, ICRTIT 2012*, pp. 308–313, 2012.
- [34] K. Mikhaylov, J. Petäjäjärvi, y T. Hänninen, “Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology,” *European Wireless 2016*, num. July, pp. 119–124, 2016.
- [35] O. Georgiou y U. Raza, “Low Power Wide Area Network Analysis: Can LoRa Scale?” pp. 1–4, 2016. [En línea]. Disponible: <http://arxiv.org/abs/1610.04793>{%}0Ahttp://dx.doi.org/10.1109/LWC.2016.2647247
- [36] D. Bankov, E. Khorov, y A. Lyakhov, “On the Limits of LoRaWAN Channel Access,” *2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT)*, pp. 10–14, 2016.
- [37] H. Mora, M. C. Del A Mora, J. Sánchez, y H. M. Chagolla Mora, “Red pública, abierta y gratuita de Internet de las Cosas en la ciudad de Querétaro,” num. 3, pp. 375–379, 2016.
- [38] J. Diego, “BoLoRa Universidad de Huelva : An experience on Internet of Things by engineering students Proyecto BoLoRa Universidad de Huelva : Una experiencia de innovación educativa con los estudiantes de ingeniería BoLoRa Universidad de Huelva : An experience on ,” num. March, 2018.
- [39] K. E. Nolan, W. Guibene, y M. Y. Kelly, “An evaluation of low power wide area network technologies for the Internet of Things,” *2016 International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp. 439–444, 2016. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7577098/>
- [40] H. Mora, M. C. Del A Mora, J. Sánchez, y H. M. Chagolla Mora, “Red Pública, Abierta y Gratuita de Internet de las Cosas en la Ciudad de Coatzacoalcos, Veracruz,” num. 3, pp. 375–379, 2016.
- [41] W. Guibene, J. Nowack, N. Chalikias, K. Fitzgibbon, M. Kelly, y D. Prendergast, “Evaluation of LPWAN Technologies for Smart Cities: River Monitoring Use-Case,” in *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. IEEE, mar 2017, pp. 1–5. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7919089/>

- [42] M. R. Seye, B. Gueye, y M. Diallo, "An evaluation of LoRa coverage in Dakar Peninsula," in *2017 8th IEEE Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON)*. IEEE, oct 2017, pp. 478–482. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8117211/>
- [43] G. O. Petracca, D. F. Lipuma, y E. R. Amigó, "LoRa Network Coverage Evaluation in Urban and Densely Urban Environment Simulation and validation tests in Autonomous City of Buenos Aires," *2017 XVII Workshop on Information Processing and Control (RPIC)*, 2017.
- [44] D. Yim, J. Chung, Y. Cho, H. Song, D. Jin, S. Kim, S. Ko, A. Smith, y A. Riegsecker, "An experimental LoRa performance evaluation in tree farm," in *2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*. IEEE, mar 2018, pp. 1–6. [En línea]. Disponible: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8336764/>
- [45] K.-H. Ke, Q.-W. Liang, G.-J. Zeng, J.-H. Lin, y H.-C. Lee, "A LoRa wireless mesh networking module for campus-scale monitoring," *Proceedings of the 16th ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks - IPSN '17*, pp. 259–260, 2017. [En línea]. Disponible: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=3055031.3055034>
- [46] G. Del Campo, I. Gomez, S. Calatrava, R. Martinez, y A. Santamaria, "Power Distribution Monitoring Using LoRa: Coverage Analysis in Suburban Areas." [En línea]. Disponible: https://ecc153fc-a-3b850097-s-sites.googlegroups.com/a/ewsn.org/ewsn/file-repository/ewsn-2018/233{__}238{__}delcampo.pdf?attachauth=ANoY7crGpjLOEKSp0jH-skMRztJWLzob5Vkl6PFBBT9XYQ5jNoHqaH4PK-gj4mQ-M6lFPFTceLN{__}Ih
- [47] J. I. Laveyne, G. V. Eetvelde, y L. Vandeveld, "Application of LoRaWAN for Smart Metering: An Experimental Verification," *International Journal of Contemporary ENERGY*, vol. 4, num. 1, 2018. [En línea]. Disponible: <http://contemporary-energy.net/v04n01a07-Joannes-Laveyne.pdf>
- [48] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, y W. Townsley, "A Study of LoRa: Long Range & Low Power Networks for the Internet of Things," *Sensors*, vol. 16, num. 12, p. 1466, 2016. [En línea]. Disponible: <http://www.mdpi.com/1424-8220/16/9/1466>
- [49] V. Sharma, I. You, G. Pau, M. Collotta, J. Lim, y J. Kim, "LoRaWAN-Based Energy-Efficient Surveillance by Drones for Intelligent Transportation Systems," *Energies*, vol. 11, num. 3, p. 573, 2018. [En línea]. Disponible: <http://www.mdpi.com/1996-1073/11/3/573>
- [50] J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, M. Pettissalo, J. Janhunen, y J. Iinatti, "Performance of a low-power wide-area network based on lora technology: Doppler robustness, scalability, and coverage," *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 13, num. 3, 2017.



- [51] J. Herrera-Tapia, E. Hernández-Orallo, A. Tomás, C. T. Calafate, J. C. Cano, M. Zennaro, y P. Manzoni, “Evaluating the use of sub-gigahertz wireless technologies to improve message delivery in opportunistic networks,” *Proceedings of the 2017 IEEE 14th International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC 2017*, pp. 305–310, 2017.
- [52] S. Naoui, M. E. Elhdhili, y L. A. Saidane, “Enhancing the security of the IoT LoraWAN architecture,” *5th IFIP International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks, PEMWN 2016*, 2017.
- [53] K. Q. Abdelfadeel, V. Cionca, y D. Pesch, “A Fair Adaptive Data Rate Algorithm for LoRaWAN,” num. February, 2018. [En línea]. Disponible: <http://arxiv.org/abs/1801.00522>
- [54] P. Weber, D. Jäckle, D. Rahusen, y A. Sikora, “IPv6 over LoRaWAN™,” *2016 IEEE 3rd International Symposium on Wireless Systems within the IEEE International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, IDAACS-SWS 2016 - Proceedings*, num. September, pp. 75–79, 2017.
- [55] R. Yasmin, J. Petäjäjärvi, K. Mikhaylov, y A. Pouttu, “On the integration of LoRaWAN with the 5G test network,” *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC*, vol. 2017-Octob, pp. 1–6, 2018.
- [56] W. C. Lee, “Estimate of Local Average Power of a Mobile Radio Signal,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 34, num. 1, pp. 22–27, 1985.
- [57] W. Mendenhall, “Introducción a la Probabilidad Y Estadística,” p. 776, 2009. [En línea]. Disponible: <http://books.google.com.pe/books?id=HRLsAaysbnEC>